

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Daniel Sedmak

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Stephan Škorić, dipl. ing.

Student:

Daniel Sedmak

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Stephanu Škoriću na svojoj stručnoj pomoći, nesebičnom zalaganju, savjetima i preporučenoj literaturi koje mi je pružio prilikom izrade ovog rada, ali i tijekom cijelog preddiplomskog i diplomskog dijela studija.

Iznimno se zahvaljujem cijeloj svojoj obitelji i djevojci Maji, a posebno roditeljima Dunji i Velimiru na svojoj podršci, razumijevanju i savjetima koji su iznimno pridonijeli uspješnom završetku ovog studija.

Na kraju, zahvaljujem se svim kolegama i prijateljima sa kojima sam dijelio dobre i loše trenutke te svim profesorima, asistentima i referentima koji su svojim trudom, direktno ili indirektno, olakšali usvajanje svih stečenih znanja.

Daniel Sedmak

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**KOMPARATIVNA ANALIZA
TOKARENJA I ORTOGONALNOG
OKRETNOG GLODANJA**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF
TURNING AND ORTHOGONAL TURN-
MILLING**

Mentor:

Prof. dr. sc. Stephan Škorić, dipl. ing.

Student:

Daniel Sedmak

Zagreb,

2013.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS OZNAKA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. SUVREMENI TRENDOWI PROIZVODNJE	3
2.1. Računalom potpomognuta proizvodnja (CAM)	4
2.2. Novi materijali za rezne alate.....	4
2.3. Modularni i višenamjenski strojevi.....	6
2.4. Obrada bazirana na znanju (KBM)	7
3. OSNOVNI POJMOVI.....	9
3.1. Karakteristike reznog alata za obradu odvajanjem čestica	9
3.1.1. Materijali reznog alata	9
3.1.2. Osnovna geometrija reznog alata.....	11
3.2. Obrada tokarenjem.....	15
3.3. Obrada okretnim glodanjem.....	21
3.4. Obradni strojevi i primjena	27
4. KOMPARATIVNA ANALIZA POSTUPAKA TOKARENJA I ORTOGONALANOG OKRETNOG GLODANJA	34
4.1. Komparativna analiza – definicija	34
4.2. Postojanost alata.....	34
4.2.1. Trošenje alata	35
4.2.2. Trošenje alata kod ortogonalnog okretnog glodanja.....	38
4.3. Generiranje i oblik odvojene čestice	40
4.3.1. Odvojena čestica kod tokarenja	40
4.3.2. Odvojena čestica kod ortogonalnog okretnog glodanja.....	43
4.4. Kakvoća obrađene površine	45
4.4.1. Teorijska hrapavost površine kod tokarenja	45
4.4.2. Teorijska hrapavost površine kod ortogonalnog okretnog glodanja.....	48
4.5. Proizvodnost postupka obrade	52
5. PRIMJER OBRADJE BREGASTE OSOVINE TOKARENJEM I ORTOGONALNIM OKRETNIM GLODANJEM.....	54
6. ZAKLJUČAK.....	66
LITERATURA.....	68

POPIS SLIKA

Slika 1. Utjecajni faktori na proizvodnju u 21. stoljeću [1]	1
Slika 2. Trendovi razvoja strojeva i procesa [4].....	3
Slika 3. Materijali za izradu alata za rezanje [10]	10
Slika 4. Tehnološki koordinatni sustav [4].....	12
Slika 5. Kinematski koordinatni sustav [4]	12
Slika 6. Kinematski koordinatni sustav – tokarski nož [4]	14
Slika 7. Kinematski koordinatni sustav – glodalo [4]	14
Slika 8. Kutovi alata za postupke obrade odvajanjem [4].....	15
Slika 9. Različiti postupi tokarenja (1- uzdužno vanjsko, 2 – CNC oblikovno, 3 - vanjsko poprečno) [14]	17
Slika 10. Tokarski nož izrađen iz jednog komada [4].....	18
Slika 11. Načini stezanja rezne pločice [12]	19
Slika 12. Oblici reznih pločica [13]	20
Slika 13. Primjer reznih alata za grubu i finu obradu tokarenjem [4].....	20
Slika 14. Okretno glodanje (1- ortogonalno, 2- koaksijalno) [14]	22
Slika 15. Mogućnost postizanja aksijalnog pomaka u ovisnosti o ekscentricitetu [2]	23
Slika 16. Pozicije ortogonalnog okretnog glodanja[2].....	24
Slika 17. Glodala iz Sandvik Coromant programa za grubu obradu[14]	25
Slika 18. Glodala iz Sandvik Coromant programa za završnu obradu[14].....	25
Slika 19. Prikaz rada 'Wiper' pločice na primjeru [14]	26
Slika 20. Revolverska glava sa pokretnim i nepokretnim alatima [17]	28
Slika 21 . Tokarsko-glodači centar [17]	28
Slika 22. Stroj 1. razine [19]	31
Slika 23. Stroj 2. razine [19]	31
Slika 24. Stroj 3. razine [19]	32
Slika 25. Stroj 4. razine - 5-osna obrada [19].....	32
Slika 26. Stroj 5 razine za složene operacije [19]	33
Slika 27. Ovisnost vijeka trajanja alata o dubini rezanja, posmaku i brzini rezanja [14].....	35
Slika 28. Prikaz kriterija istrošenosti alata [4]	36
Slika 29. Primjer mogućih oblika trošenja [4]	37
Slika 30. Taylorove tipske krivulje trošenja za različite brzine [4]	38
Slika 31. Istrošenje alata pri obradi tokarenjem i ortogonalnim okruglim glodanjem, pozicija ekscentar, pri istim uvjetima obrade [21]	39
Slika 32. Najčešći oblici odvojene čestice (1 - povoljan oblik za fino tokarenje, 2 - povoljan oblika za grubo tokarenje, 3 - nepovoljan oblik) [20]	41
Slika 33. Ovisnost oblika odvojene čestice o dubinu obrade i posmaku [14].....	42
Slika 34. Odnosi zahvata alta i obratka kod ekscentričnog ortogonalnog glodanja [2]	43
Slika 35. Teoretski oblik odvojene čestice kod ortogonalnog okretnog glodanja – pozicija ekscentar [2]	44
Slika 36. Teorijski i stvarni oblik odvojene čestice kod ortogonalnog okruglog glodanja: a) pozicija centar, b) pozicija ekscentar [2]	45
Slika 37. Izgled obrađene površine nakon prolaza alatom bez radijusa vrha alata [4]	46
Slika 38. Izgled obrađene površine nakon prolaza alatom sa radijusom vrha alata [4]	47
Slika 39. Izgled obrađene površine nakon prolaza glodala postupkom ortogonalnog okretnog glodanja [2].....	48

Slika 40. Ovisnost parametra hrapavosti obrađene površine (Ra) o posmaku (f) i brzini rezanja (vc) kod ortogonalnog okretnog glodanja [24].....	51
Slika 41. Ovisnost parametra hrapavosti obrađene površine (Ra) o posmaku (f) i brzini rezanja (vc) kod tokarenju[24].....	51
Slika 42. Indeks pogodnosti ekscentričnog ortogonalnog okretnog glodanja i tokarenja [2] ..	53
Slika 43. Smanjenje vremena obrade kod ležajnih rukavaca koljenastih osovina primjenom klasičnog i HSC okretnog glodanja [25]	53
Slika 44. Bregasta osovina [26].....	54
Slika 45. Obradni centar Mori Seiki - bez zaštitnih dijelova [17].....	55
Slika 46. Ugrađeni motor za pokretne alate [17]	56
Slika 47. Uzdužno tokarenje[26].....	57
Slika 48. Uzdužno vanjsko tokarenje – CAD prikaz	58
Slika 49. Grubo tokarenje [26]	58
Slika 50. Grubo glodanje – detaljniji CAD prikaz	59
Slika 51. Grubo ravno glodanje bregova [26]	59
Slika 52. Detaljniji CAD prikaz grubog glodanja bregova	60
Slika 53. Grubo ortogonalno okretno glodanje bregova i mjesta uležištenja [26]	61
Slika 54. Grubo ortogonalno okretno glodanje bregova i mjesta uležištenja – CAD prikaz ...	62
Slika 55. Prikaz detalja nakon obrade ekscentričnim ortogonalnim okretnim glodanjem.....	62
Slika 56. Fino ortogonalno okretno glodanje bregova kuglastim glodalom [26].....	63
Slika 57. CAD prikaz bregaste osovine nakon finog ortogonalnog okretnog glodanja.....	63
Slika 58. Fino završno tokarenje mjesta uležištenja i bočnih strana bregova [26]	64
Slika 59. Izgled površine prije i nakon fine obrade tokarenjem mjesta uležištenja	64
Slika 60. Bušenje kanala za podmazivanje [26].....	65

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_{ob}	mm^2	presjek obodnog odreska odvojene čestice
$A_{če}$	mm^2	presjek čeonog odreska odvojene čestice
C_T		Taylorova konstanta
D_o	mm	promjer obratka
D_g	mm	promjer glodala
E	mm	ekscentricitet
I_p		indeks pogodnosti
KB	mm	udaljenost sredine kraterskog trošenja od vrha nepotrošene oštrice
KM	mm	širina kraterskog trošenja prednje površine alata
KT	mm	dubina kraterskog trošenja prednje površine alata
L_f	m	put glodanja u posmičnom smjeru
P_f		ravnina kretanja alata
P_o		ortogonalna ravnina
P_r		osnovna ravnina
P_s		ravnina rezanja
R_a	mm	srednje aritmetičko odstupanje profila hrapavosti
R_g	mm	radijus glodala
R_o	mm	radijus obratka
R_t	μm	teorijska hrapavost
R_z	μm	stvarna visina neravnina
T	min	vijek trajanja alata
VB	mm	širina pojasa istrošenja stražnje površine alata
VB_{max}	mm	maksimalna širina pojasa istrošenja stražnje površine alata
$V_{oč}$	mm^3	volumen koji zauzima odvojena čestica
V_M	mm^3	volumen materijala pretvoren u odvojenu česticu

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a_e	mm	širina zahvata glodala i obratka
a_p	mm	dubina obrade
$a(\varphi)$	mm	visina obodnog odreska, trenutna dubina obrade
b_{ξ}	mm	širina čeonog odreska odvojene čestice
f	mm	posmak
f_{ax}	mm	aksijalni posmak po okretaju glodala kod OOG
f_w	mm	posmak po 'wiper' pločici
f_z	mm	posmak po zubu
f_{zo}	mm	posmak po zubu glodala u smjeru obodne posmične brzine
h_{ξ}	mm	debljina čeonog odreska odvojene čestice
h_o	mm	debljina obodnog odreska odvojene čestice
l_s	mm	duljina oštrice alata
m		konstanta alata i materijala
n	1/min	broj okretaja obratka
n_g	1/min	frekvencija vrtnje glodala
n_o	1/min	frekvencija vrtnje glodala
r_{ϵ}	mm	radijus vrha alata
t_g	min	strojno vrijeme obrade
v_c	m/min	brzina rezanja
v_e	m/min	ukupna brzina rezanja
v_f	m/min	posmična brzina
v_{fax}	m/min	aksijalna posmična brzina rezanja
v_{fo}	m/min	obodna posmična brzina
z_g		broj zubi glodala
α_0	°	stražnji kut alata
β_0	°	kut klina
γ_0	°	prednji kut alata
ϵ_r	°	kut vrha alata
λ_s	°	kut nagiba oštrice
ψ	°	kut rotacije obratka
$\Delta\psi$	°	središnji kut poligona
κ_r	°	napadni kut
η	°	kut zavojnice (između obodne i aksijalne posmične brzine)
φ	°	zahvatni kut glodala (kut rotacije glodala)

SAŽETAK

Obradni sustav je suvremen samo ako su i svi njegovi sastavni dijelovi suvremeni. Svakim danom se razvijaju novi trendovi i usavršavaju stari na području proizvodnje počevši od novih materijala obradaka i alata, preko usavršavanja računalne podrške i razvoja novih strojeva i postupka obrade. Promijenjen je pogled na način proizvodnje iz čega se pojavila nova proizvodna filozofija koja uvođenjem novih obradnih postupaka, novih materijala obradaka i alata u proizvodni proces rezultira istodobno velikim povećanjem proizvodnosti rada, poboljšanjem kvalitete proizvoda i snižavanjem troškova proizvodnje. Osobita kombinacija i sažetak različitih postupaka na jednom stroju je pri tome od osobitog značaja. Ortogonalno okretno glodanje predstavlja jednu takvu kombinaciju.

U radu je prikazan sistematizirani pojam postupka ortogonalnog okretnog glodanja. Razmatrani su postupci tokarenja i okretnog glodanja koji se najprije teorijski analiziraju i razrađuju čime se cjelovito razmatraju osnovne teorijske tehnološke značajke i zakonitosti kojima ti procesi podliježu. Kako je postupak ortogonalnog okretnog glodanja nastao iz težnje da se u procesu tokarenja umjesto tokarskog noža upotrijebi glodalo sa vlastitim pogonom s ciljem postizanja efikasnije i produktivnije proizvodnje, u radu je poseban naglasak dan na komparativna analiza ta dva postupka.

Također, na primjeru bregaste osovine prikazan je postupak obrade koji sadržava postupak tokarenja, ali i ortogonalnog okretnog glodanja kao zamjenu za tokarenje. Razvoj novih suvremenih višefunkcionalnih i modularnih strojeva potaknuo je sve veću primjenu ortogonalnog okretnog glodanja što je, uz uočene prednosti pred tokarenjem, razlog zbog kojeg taj proces ima smisla sustavno istraživati i analizirati.

Ključne riječi: komparativna analiza, tokarenje, okretno glodanje, postojanost alata, kakvoća površine, proizvodnost

SUMMARY

Machining system is modern only if all of its components are contemporary. In domain of industrial production, every day new trends are developing and old ones are being improved starting from new tool and workpiece materials to development of computer support and new machines and processes. Production mode view has changed, from which emerged new production philosophy and resulted with implementing new machining processes and new tool and workpieces materials while simultaneously increasing productivity and product quality and decreasing productions costs. Particular combinations and a summary of the various procedures on a single machine are thereby of particular importance. Orthogonal turn-milling presents one such combination.

This paper present systematic term of orthogonal turn-milling. Processes of turning and orthogonal turn-milling are first theoretically analyzed and elaborated which comprehensively considers the basic theoretical technological features and laws that these processes are subjected to. As orthogonal turn-milling is process which was raised from idea to use milling tool instead of turning tool in turning process, in order to achieve more efficient and productive manufacturing, the paper emphasis on the comparative analysis of those two processes.

Also, chosen example of camshaft for this paper displays machining process that includes turning and orthogonal turn-milling, as substitute for turning. The development of new, modern multifunctional and modular machines stimulated more frequent use of orthogonal turn-milling which, with its obvious advantages over turning, is main reason why this process makes sense to systematically explore and analyze.

Key words: comparative analysis, turning, turn-milling, tool life, surface finish, productivity

1. UVOD

Industrijska proizvodnja temelj je gospodarstva svake razvijene države te je, općenito, ekonomska pozicija države u svijetu bazirana na razini industrijske aktivnosti. Pritisak konkurenata, unutar i van države, potiče proizvođače na razvoj novih tehnologija i sustava. Posljednjih 10-ak godina razvijeni su novi proizvodni procesi te mnogi automatizirani sustavi koji su doprinijeli poboljšanju učinkovitosti strojeva i operatera, povećanju produktivnosti te smanjenju troškova proizvodnje. Poseban naglasak se stavlja na razvoj alata kojima su industrijskoj proizvodnji, da bi se zadovoljili zahtjevi tržišta, omogućeni bolji čimbenici obrade kao što su veće brzine obrade, bolji nadzor procesa, veća točnost te veća fleksibilnost procesa. Na inženjerima moderne proizvodnje je zadatak da na temelju stalno rastućeg broja različitih proizvoda s jede strane, te različitih načina i mogućnosti obrade s druge strane, odaberu najbolje rješenje koje će dati kvalitetan proizvod i nisku cijenu izrade. Upravo je ovo krizno vrijeme uzrokovalo napredak u svim aspektima proizvodnje čime je proizvođačima omogućena brža i kvalitetnija izrada proizvoda sa troškovima manjima nego ikad prije [1]. Najutjecajniji faktori na današnju proizvodnju i proizvodnu okolinu prikazani su na slici 1.



Slika 1. Utjecajni faktori na proizvodnju u 21. stoljeću [1]

Prodorom znatnosti, novih obradnih postupaka, novih alatnih materijala kao i materijala obradaka, a posebno informatike, u proizvodnji dolazi do ostvarivanja novog načina proizvodnje koja je automatizirana do računalom integrirane proizvodnje i inteligentnih i prilagodljivih sustava. Ne radi se više o novom pristupu proizvodnji već i novoj proizvodnoj filozofiji koja pretpostavlja [2]:

- uvođenje novih obradnih postupaka, novih materijala obradaka i alata u proizvodni proces, koje rezultira istodobno povećanjem proizvodnosti rada, kvalitete proizvoda i snižavanjem troškova
- nultu kontrolu kvalitete
- princip određivanja cijene prema kojemu je cijena konstanta, a dobit se ostvaruje snižavanjem troškova proizvodnje

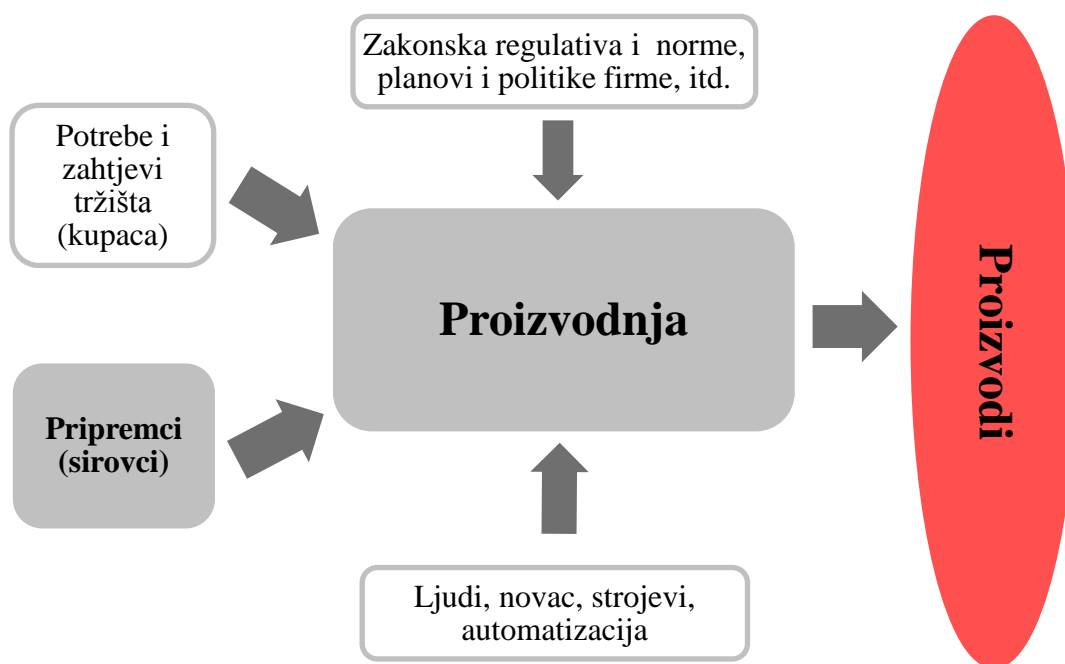
U takvim se uvjetima i pred obradne sustave postavljaju visoki zahtjevi zbog kojih se razrađuju nove koncepcije strojeve, novi prigoni i nova upravljanja. Suvremeni alatni strojevi moraju ispunjavati zahtjeve za kraćim vremenima obrade, većom produktivnošću i većim stupnjem iskorištenja. Uz to moraju udovoljiti zahtjevima za stalnim povećanjem točnosti i kvalitete obrade na njima, te sve strožim zahtjevima očuvanja okoliša. Trend razvoja današnjih obradnih centara, bilo tokarskih ili glodaćih (TOC ili GOC), je da imaju koncentraciju različitih operacija obrade u jednom stezanju sirovca, odnosno mogu obrađivati obradak različitim postupcima obrade odvajanjem čestica s više strana, a cilj je potpuna obrada izratka na jednom obradnom sustavu i u jednom stezanju. [3]

Modularna koncepcija gradnje suvremenih alatnih strojeva omogućuje i potiče nezavisan razvoj i usavršavanje pojedinih modula, ali nedovoljno razvijeni principi rekonfigurabilnosti i visoki troškovi ograničavaju njihovu primjenu. Naime, podrazumijeva se da će ukupna cijena suvremenog alatnog stroja biti to veća što su skuplji pojedini moduli koji su u njega ugrađeni.

Iako ne tako često i u velikoj mjeri kao na području strojeva, nova rješenja postižu se i u proizvodnim tehnikama obrade odvajanjem čestica kako bi se poboljšala ekonomičnost postupaka. Iako su tokarenje i glodanje već odavno dokazano produktivni i isplativi procesi obrade došlo se do novih rješenja obrade odvajanjem čestica kombinacijom ta dva postupka, a to je okretno glodanje. Okretno glodanje je proces kod kojeg je kombinacijom tokarenja i glodanja dobivaju općenito cilindrične, okrugle i neokrugle, površine [2].

2. SUVREMENI TRENDovi PROIZVODNJE

Obradni sustav je suvremen samo ako su i svi njegovi sastavni dijelovi suvremeni. Naime, suvremeni rezni alati ne mogu dati očekivane rezultate kod obrade na starijim alatnim strojevima jer su oni građeni od starih modula. Oni nemaju mogućnost ostvarivanja traženih kataloških režima obrade za te suvremene rezne alate pa je njihova iskoristivost mala, a vrijeme izrade se produljuje i troškovi obrade se povećavaju. Neophodno je zastarjeli alatni stroj zamijeniti novim koji je građen od suvremenih visokobrzinskih i visokodinamičkih modula. Takav suvremeni alatni stroj onda može osigurati modernu i konkurentnu industrijsku proizvodnju. Novosti u proizvodnji poput dodatnih softverskih rješenja, stalni razvoj novih reznih alata, modularni alatni strojevi trenutni su trendovi u proizvodnji koji su malo detaljnije opisani u ovom poglavlju [3].



Slika 2. Trendovi razvoja strojeva i procesa [4]

2.1. Računalom potpomognuta proizvodnja (CAM)

Uz napredak strojeva i alata puno je napredovao programski dio vođenja cjelokupnog proizvodnog procesa (CAM – Computer Aided Manufacturing). Od jednostavnih koraka poput crtanja ravnih linija, rupa ili skošenja softver se razvio sve do gotovo potpune automatizacije procesa obrade. [5]

Novost je i *sposobnost automatskog prepoznavanja karakteristika modela* poput rupa, džepova i sl. gdje softver automatski prepoznaje specifične karakteristike modela te predlaže način obrade i generira NC kod za obradni stroj. Ovaj način prepoznavanja modela, kao i neki drugi, dio su 'obrade bazirane na znanju' (KBM – Knowledge-Based Machining) koja je detaljnije prikazana u poglavlju 2.4. [5]

Kod velikih brzina obrade proces je ograničen zbog malih dubina rezanja kako bi se postigla dobra kvaliteta površine te kako bi se izbjeglo oštećenje reznog alata, obratke ili vretena. Upotrebom softvera za *optimalizaciju posmaka* moguće je ostvariti bolju učinkovitost sa većim dubinama rezanja pri visokim posmacima, a istovremeno zaštititi rezni alata i stroj. Softver unaprijed daje pretpostavke gdje postoji mogućnost prevelikog opterećenja te prilagođava posmak na tim područjima obrade. Kada izađe iz potencijalno opasnog područja posmak se ponovno povećava na maksimalnu moguću razinu. [5]

Posljednja i najnovija softverska rješenja koja su još uvijek u fazi testiranja, u kombinaciji sa KBM, imaju trend *potpune automatizacije procesa* odnosno pretvorbom 3D modela u program koji je biti izveden na stroju. Softver će biti u mogućnosti automatski izabrati proces obrade, rezne alata i parametre obrade te na kraju izraditi program. Omogućeno je učenje, putem umjetne inteligencije, od ranije napisanih programa od strane tehnologa tako da program predlažu prvo ona rješenja kojima je sklona pojedina tvrtka i tehnolog odnosno kakav način obrade se preferira. [5]

2.2. Novi materijali za rezne alate

Trendovi u proizvođačkoj industriji usko su povezani sa onima u razvoju reznih alata. Konstantne promjene u materijalima koje je potrebno obraditi, samih obradnih procesa pa čak i zakonima pojedinih država rezultiraju paralelnim napretkom u industriji izrade reznih alata. Da bi proizvođači alata zadovoljili potrebe obrade materijala (produktivnost i ekonomičnost) koji su sve tvrdi i lakši moraju razviti i nove rezne materijale kombiniranjem raznih prevlaka i

geometrija alata. Velika otkrića u industriji proizvodnje reznih alata se događaju, ali ipak jako rijetko. Razvoj novi alata možemo očekivati kroz razna poboljšavanja postojećih alata te nekom novom kombinacijom već postojeći alatnih materijala. Neke od takvih poboljšanja i predviđanja u kojem smjeru bi to trebali ići su opisana u daljnjem tekstu. [6]

Jedan od primjera napretka reznih alata jesu oni za obradu aluminija. Aluminij je u automobilske industrije jako važan materijal koji se sve više koristi kako bi se smanjila masa automobila te tako smanjila potrošnja goriva. Alati koji trenutno dominiraju u obradi aluminijских legura su polikristalni dijamant te tvrdi metali no ipak se krenulo u pojačano istraživanje i upotrebu tvrdih metala prevučenih tankim dijamantnim slojem. Dijamanti sloj omogućava izrazito dobru otpornost na trošenje, a ujedno i različite oblike rezne oštrice i mogućnost kontrole odvojene čestice koje imaju kompleksan geometrijski oblik. Njegova upotreba se širi i na svrdla i glodala za čelono glodanje. Te prednosti omogućavaju zamjenu alata od neprevučenih tvrdih metala i skupljih PCD alata. [6]

U automobilske industrije velika je upotreba ljevova. Do sada se jako često koristio sivi lijev no njega u dosta slučajeva počinje zamjenjivati nodularni lijev u proizvodima kao što su kućišta, koljenasta vratila i bregaste osovine. Ipak, nodularni lijev je težak za obradu te se od alata traži otpornost na abrazivno trošenje, otpornost na neujednačeno rezanje te velika produktivnost. Nodularni lijev se do sada obrađivao tvrdim metalima koji su bili prevučeni CVD (Chemical Vapor Deposition – kemijsko prevlačenje iz parne faze) postupkom koji su prisutni na tržištu već oko 30 godina. S obzirom da je više od polovice svih prevlaka napravljeno upravo CVD postupkom jasno govori o njegovoj kvaliteti. Ipak, pronađena mu je mana, a to je stvaranje 'eta' faze prilikom izrade prevlake na visokim temperaturama (oko 1000°C). Prevlačenje CVD postupkom se počelo zamjenjivati MTCVD (Medium Temperature Chemical Vapor Deposition) postupkom kojim se prevlake nanose pri manjim temperaturama čime se izbjegava stvaranja 'eta' faze u području između prevlake i osnovnog materijala. Rezultat je duži vijek trajanja alata i povećana tvrdoća u odnosu na CVD postupak.

Postupak koji se u određenim operacijama također pokazao bolji u odnosu na CVD postupak je – PVD (Physical Vapor Deposition – fizikalno prevlačenje iz parne faze). Fizikalno prevlačenje iz parne faze, koje se odvija pri temperaturama oko 500°C, omogućuje prevlačenje oštih rubova reznog materijala koji su jako bitni kod obrada poput glodanja, bušenja, urezivanja navoja i odrezivanja. Također, oštri rubovi smanjuju sile rezanja što opet omogućuje obradu tankostijenih obradaka. Među prvim PVD prevlakama bile su one od titan nitrida (TiN), a sada su razvijeni iz titan karbonitrid (TiCN) te titan aluminijnitrid (TiAlN)

koji ima izrazito dobru otpornost na kemijsko trošenje. Razvijene su i nešto 'mekanije' prevlake kao što je molibden disulfid (MoS_2). Moguća je i kombinacija tvrde (TiAlN) i mekane prevlake (MoS_2) čime se dobiva dobra otpornost na trošenje, a ujedno i vanjski mekši sloj koji lakše odvodi odvojenu česticu. [6]

Mnogi novi zakoni i regulative o zaštiti okoliša natjerali su proizvođače da počnu razmišljati o suhoj obradi zbog puno strožih uvjeta odlaganja sredstva za hlađenje i podmazivanje (SHIP). Iako suha obrada nije moguća u svim procesima, pravilni odabir materijala reznog alata može omogućiti korisnicima izbjegavanje korištenja SHIP-a kao što je npr. rezni alat sa prevlakom od ranije spomenute aluminij prevlake čime se je moguća obrada čelika većim posmacima i pri višim temperaturama. Suha obrada će u dogledno vrijeme zasigurno potaknuti razvoj alatnih materijala koji će biti još otporniji pri višim temperaturama. [6]

Pomaci su napravljeni i kod keramičkih materijala. Iako nedavno razvijena nitridna keramika (Si_3N_4) pruža dobru otpornost na lom, otpornost na kemijsko trošenje je ograničilo njenu upotrebu. Taj problem je riješen upotrebom CVD aluminijske prevlake (Al_2O_3) koja je proširila područje upotrebne nitridne keramike čime je moguće obrađivati i nodularne ljevove [6].

2.3. Modularni i višenamjenski strojevi

Trend ka sve većoj upotrebi modularnih, višeosnih i modularnih alatnih strojeva je očit. Počevši od alata koji su sve kompleksniji kako bi zadovoljili potrebe za više vrsta obrade sa jednim alatom, preko tokarskih obradnih centara sa 10 ili 12 osi do četvero ili petero-osnim tokarskim ili tokarsko-glodaćim centrima koji više nisu nikakva novost u modernoj proizvodnji. Dijelovi koji su do sada zahtijevali obradu jednom, dva ili čak tri obradna stroja sada se mogu proizvoditi na samo jednom stroju uz veću proizvodnost, ekonomičnost i kvalitetu obrađene površine. modularnoj gradnji. Tako danas postoje tokarski obradni centri s modulom za automatsku izmjenu alata, a to je revolveraska glava koja sadržava mirujuće i pogonjene rezne alate. Taj modul je razvijen tako da se s 10 ili češće 12 reznih alata, došlo do 20 reznih alata. Ako kupac procijeni da taj broj reznih alata nije dovoljan za obradu njegovog proizvodnog programa, moguće je naručiti tokarski obradni centar koji ima dvije revolverске glave.

Petosni strojevi koji imaju tri međusobno okomite osi i rotacijske osi koje su kreću istodobno do sada su bili rezervirani i korišteni najvećim dijelom za proizvodnju kompleksnih

dijelova za avionsku industriju. Trenutno je takva vrsta stroja postala zastupljena i u izradi kalupa i preša.

Brzi i pouzdan protok podataka, ujednačena putanja alata sa minimalnim odstupanjem, jednaka odvojena čestica kroz cijeli postupak obrade radi maksimalne postojanosti alata te iznimno tvrdi rezni alati postojani na visokim temperaturama su zahtjevi koji zadovoljavaju pretpostavke visokobrzinske obrade tako da je njihova pojava u proizvodnji danas sasvim normalna.

Razvoj glodaćih obradnih centara ide u smjeru da se troosni alatni strojevi, na kojima se vrši troosno glodanje, zamijene višeosnim glodaćim obradnim centrima koji omogućuju simultanu višeosnu obradu. Svjetski proizvođači glodaćih obradnih centara, nude na tržištu petoosne glodaće obradne centre, koji se onda opet razlikuju po konstrukcijskom rješenju i ugrađenim modulima. [3][7]

2.4. Obrada bazirana na znanju (KBM)

Obrada bazirana na znanju (KBM - "Knowledge-based machining") pojam je koji nema točnu definiciju niti precizno značenje već se odnosi na širok raspon sposobnosti koji se razlikuje od sustava do sustav. Ipak jedan je od novi trendova proizvodnje odnosno proizvođača strojeva i softverskih rješenja za iste koji je razvijen s ciljem omogućavanja veće produktivnosti programera alatnog stroja, ali i učinkovitijeg i pouzdanijeg programa. Većinom se koriste dva pristupa KBM od kojih je jedan pruža informacija o obradi, a drugi pristup pamti informacije o obradi. Kombinacija ta dva pristupa je također moguća.

Osnovna ideja KBM softverskog rješenja jest povezivanje karakteristika obratka (modela) sa obradnim procesima i koracima. Jednostavne karakteristike obratka poput rupa, džepova, utora i sl. povezuju se s odabranim procesima te se spremaju u bazu podataka gdje se pamte parametri obrade, rezni alat, materijal obratka, redoslijed operacija za svaku pojedinu karakteristiku.

Povezivanjem KBM baze podataka sa opcijom softverskog rješenja za automatskim prepoznavanjem karakteristika obratka odnosno modela i realnom simulacijom dobiva se kompletno rješenje koje svoju vrijednost pokazuje kroz organizaciju, smanjenje vremena programiranja i lakši odabir operacija za obradu kompleksnih obradaka ili obradaka koji imaju puno različitih karakteristika odnosno operacija.

Bez obzira u kojem obliku se KBM koristi pretpostavka je da se znanja i spoznaja o procesima obrade, reznim alatima i materijalima mijenjaju. Kroz određeni vremenski period, kako programeri pune bazu podataka novim i aktualnim podacima, operacije obrade postaju dosljedne i jednake kao i one prije te na taj način proizvođači mogu garantirati sve bolji i bolji proizvod te biti korak ispred konkurencije koja koristi isključivo znanje pojedinog ili grupe programera [7][8].

3. OSNOVNI POJMOVI

3.1. Karakteristike reznog alata za obradu odvajanjem čestica

Materijali reznih alata u današnjoj industriji obrade odvajanjem čestica metalnih materijala sežu od visokougličnog čelika pa sve do keramike i dijamanta. Stoga je važno da budemo svjesni: da razlike između tih materijala postoje, koje su to razlike i da nađemo ispravan način upotrebe tih materijala. Jednako tako postoji i veliki broj proizvođača alata koji vrlo često daju slične oznake pojedinim alatima, iako su namijenjeni za potpuno drugačiju svrhu. Ipak, proizvođači uz oznake reznog alata navode i njihovu primjenu radi lakše orijentacije krajnjeg korisnika.

Cjenovni rang, s obzirom na područje primjene i vrstu materijala, je također različit što ne znači da će najskuplji rezni alat biti i najbolji. Upravo su cijena i konstantan napredak u tehnologiji izrade reznih alata faktori koji krajnje korisnike reznih alata tjeraju na stalne usporedbe karakteristika alata prilikom određivanja parametara obrade odnosno vrste alata. Odabir nije toliko jednostavan jer neće uvijek biti optimalan najjeftiniji ili najskuplji alat već je potrebno naći alata s kojim će posao biti odrađen brzo, efikasno i ekonomično. Jeftiniji rezni alat je možda napravljen od mekanijeg materijala te će se brže potrošiti, a obrađena površina neće biti zadovoljavajuće kvalitete dok će skuplji alat, izrađen od tvrdog materijala, odraditi isti posao kao i neki drugi mekaniji alat. U ovom segmentu se mogu postići značajne uštede.

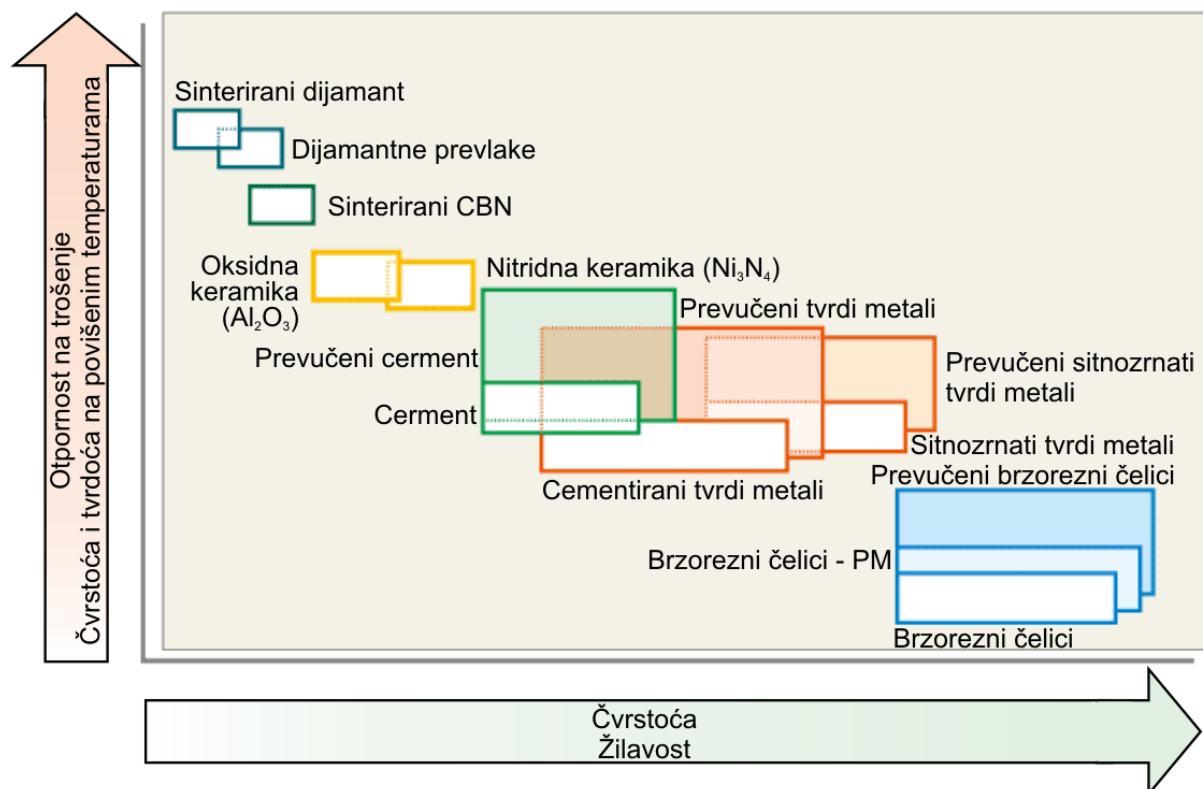
3.1.1. Materijali reznog alata

Kao i kod svakog postupka obrade nekog proizvoda tako se i kod postupaka obrade odvajanjem čestica postavljaju određeni zahtjevi na alata kojim se postupak provodi.

Spomenut ćemo tri karakteristike koje se nameću kao najvažnije kada govorimo o reznim sposobnostima alata, a to su [9]:

- Otpornost prema trošenju
- Žilavost
- Otpornost pri povišenim temperaturama
- cijena i dostupnost kod nabave

Otpornost prema trošenju je proporcionalna tvrdoći materijala reznog alata no jako je teško napraviti alat koji će imati jako veliku tvrdoću, a s time i visoku žilavost. Zbog toga se sve više pokušavaju razviti novi materijali i postupci pomoću kojih bi takva svojstva bila što više približena. To je vidljivo i na slici 3. da se kao najtvrdi pokazuju keramika, CBN i PCD koji se puno rjeđe koriste nego tvrdi metali koji daju dobar odnos tvrdoće i žilavosti, ali i dobru otpornost prema visokim temperaturama čime su bitno utjecali na razvoj tehnologije obrade odvajanjem čestica.



Slika 3. Materijali za izradu alata za rezanje [10]

Najčešće upotrebljavani materijala za izradu reznih alata [4]:

1. **Brzorezni čelici (HSS):** čelici legirani kromom (Cr), vanadijem (V), volframom (W), kobaltom (Co) i molibdenom (Mo). Brzorezni čelici imaju dobru otpornost na višim temperaturama te 3-4 puta veće brzine rezanja u odnosu na alatne čelike.
2. **Tvrđi metal:** sastoje se od metalnih karbida kao nosioca tvrdoće (WC, TiC i TaC, kao i NbC) te Co, također i Ni i/ili Mo, kao veziva. Tvrdoća im dostiže vrijednosti 1300 do 1800 HV, a pri temperaturi od 1000°C snizi se za samo 10%. Sinterirani tvrdi metali s TiC su i pri 700°C tvrdi su od brzoreznog čelika pri sobnoj temperaturi. Također i žilavost im je zamjetna.

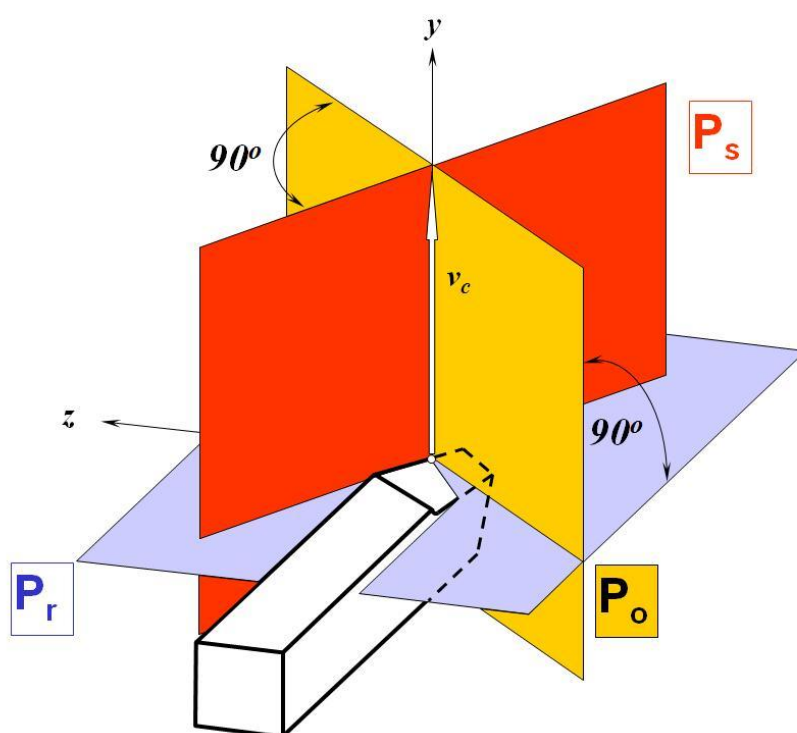
3. **Cerment:** kompozitni materijal sastavljen od keramike i metala. Konstruiran s ciljem dobivanja tvrdoće i otpornosti na visokim temperaturama kakvu ima keramika te žilavosti dobivenom korištenjem metala (oksidi, boridi i karbidi). Ovisno o željenim i potrebnim svojstvima, cerment može biti izrađen i od metalne matrice, ali u većini slučajeva cerment ne sadržava više od 20% metala.
4. **Keramika:** sastoji se većinom od aluminijevog oksida (Al_2O_3) i silicijevog nitrida (Si_3N_4). To su rezni alata se vrlo velikom tvrdoćom i podnose jako velike temperature te nema kemijskih reakcija sa obratkom. Postižu se oko 4 puta veće brzine nego sa cermentom. Nedostatak je niska žilavost.
5. **Dijamant:** dijamant je cisti ugljik. Pet puta je tvrdi od TM, ali mu je savojna čvrstoća tek 300 N/mm². Dijamant je najtvrdi rezni materijal i najotporniji prema trošenju. Nedostaci su osjetljivost na udarce i niska tlačna čvrstoća. Postojan je samo do temperature 600°C, a iznad 800°C izgara. U uporabi je prirodni monokristalni dijamant (za finu obradbu), prirodni polikristalni dijamant i umjetni polikristalni (PCD) dijamant. Dijamantni alati primjereni su za obradbu Al, Al legura, Ti, Cu i Cu legura, Pt, Au, Ag, umjetnih materijala, tvrde gume, grafita, keramike, stakla, kamena i azbesta.
6. **Kubični bor-nitrid (CBN):** drugi najtvrdi materijal koji se koristi kao alternativa dijamantu radi niže cijene. Materijal koji kombinira visoko tvrdoću i otpornost na temperaturama do 2000 °C. Primjeren je za obradbu čelika tvrdoće 54-68 HRC, legura na temelju kobalta i nikla, te brzoreznih čelika.

3.1.2. Osnovna geometrija reznog alata

Alati, potrebni za obradu odvajanjem čestica, imaju u većini slučajeva zajednički geometrijski oblik, što znači da im se osnovni elementi (površine, kutovi, oštrice) pojavljuju kod svih vrsta obrade odvajanjem čestica bez obzira koliko reznih dijelova ima alat. Osnovni oblik svih alata sa čvrstim oštricama je klin [11].

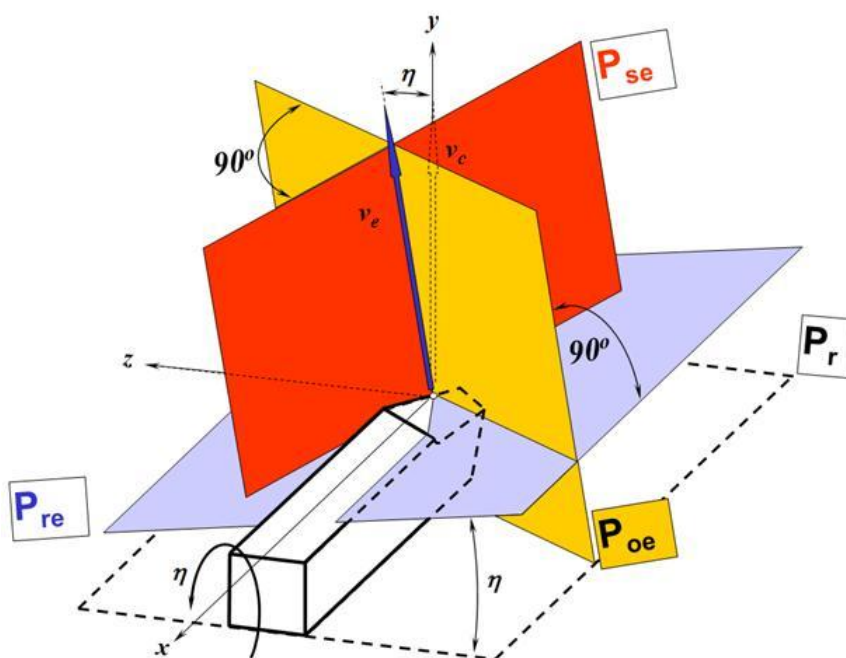
Kutovi alata su neophodni za određivanje položaja rezne oštrice, prednje i stražnje površine reznog dijela alata. Kutovi se uvijek odnose na određenu točku na reznoj oštrici. Kada su rezna oštrica, prednja i stražnja površina zakrivljene, za određivanje kutova su mjerodavne tangente, odnosno tangencijalne ravnine kroz odabranu točku. Kutovi se definiraju u određenom koordinatnom sustavu pa se tako razlikuje:

- **tehnološki koordinatni sustav:** koristi se za definiranje kutova alata bitnih za konstrukciju, izradu, oštrenje i kontrolu alata



Slika 4. Tehnološki koordinatni sustav [4]

- **kinematski koordinatni sustav:** koristi se za definiranje kutova alata u procesu rezanja

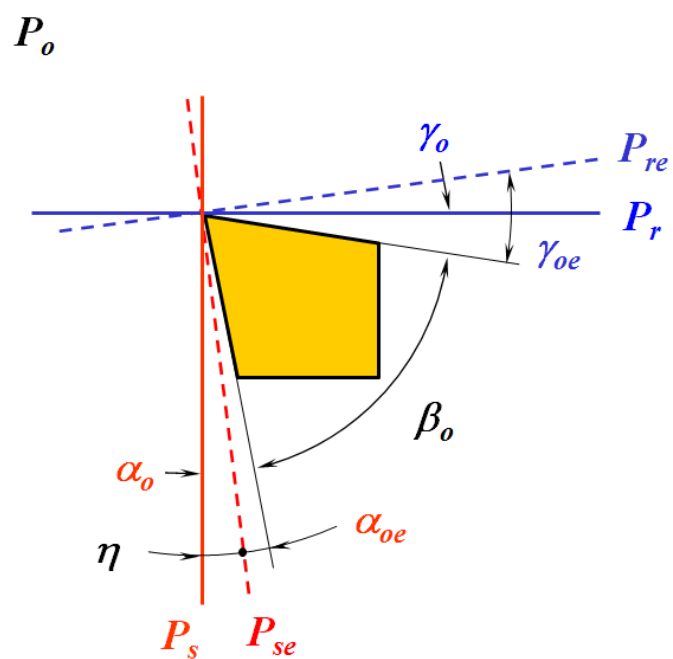


Slika 5. Kinematski koordinatni sustav [4]

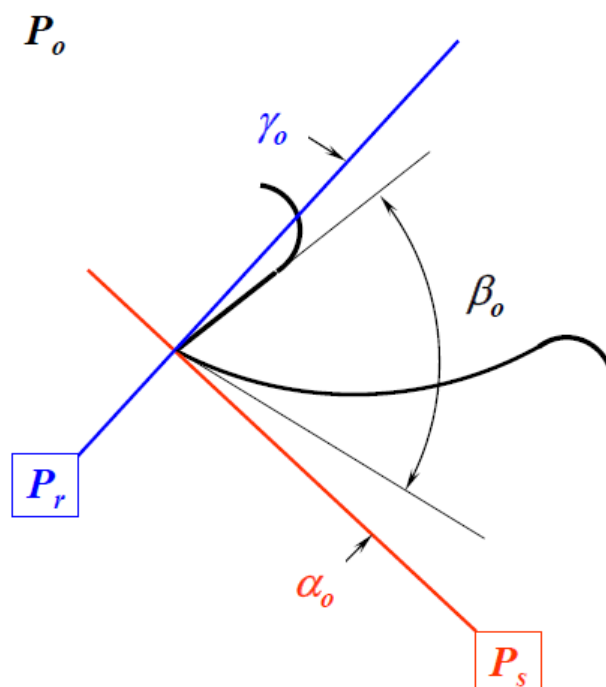
Svaki kut je označen slovom grčkog alfabeta i sufiksom koji odgovara ravnini u kojoj se kut mjeri. (Primjer γ_0 – prednji kut u ravnini P_0). Za radne (kinematske) kutove dodaje se još i sufiks “e”.

Kutovi prikazani na slikama 6., 7. i 8. se definiraju pomoću referentnog sustava ravnina koji je prikazan na slici 4. [4]

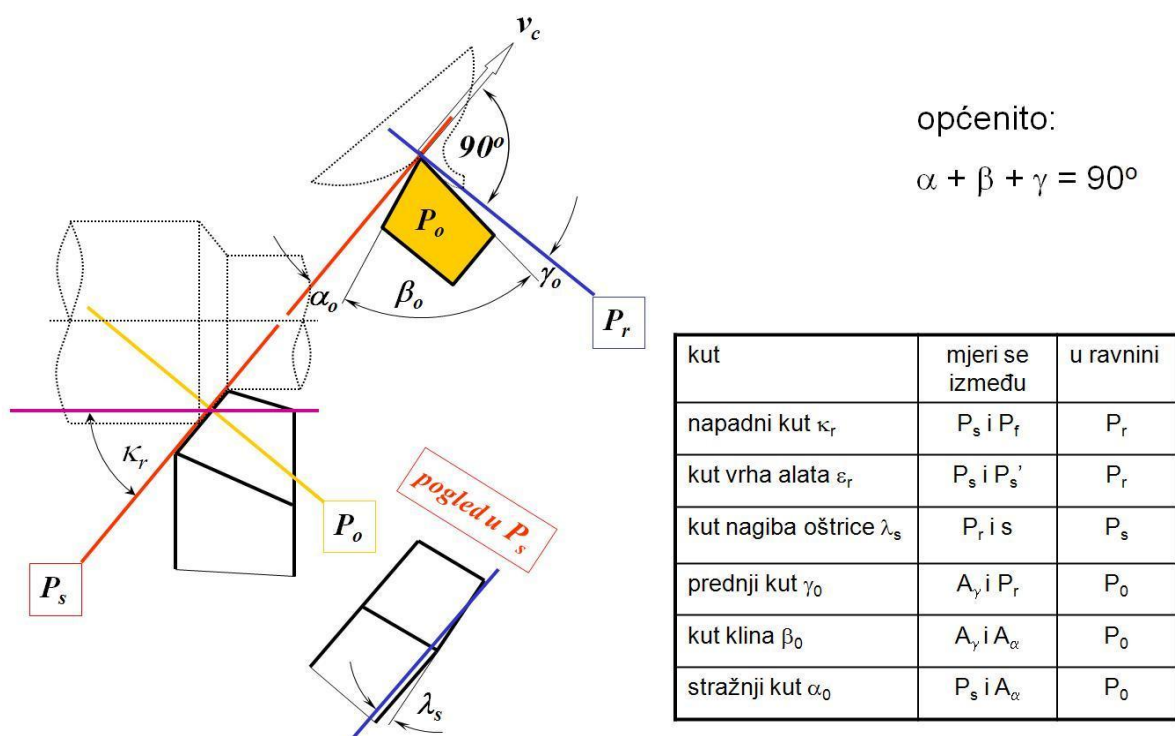
- **P_r** - osnovna ravnina: je okomita na pravac glavnog gibanja u promatranoj točki oštrice i istodobno je okomita ili paralelna na neku površinu ili os alata a koja je bitna za izradu, oštrenje ili kontrolu alata
- **P_r** - ravnina kretanja: je okomita na P_r i paralelna pravcem posmičnog gibanja u promatranoj točki oštrice
- **P_s** - ravnina rezanja: je okomita na P_r i paralelna sa tangentom na oštricu u promatranoj točki oštrice
- **P_0** - ortogonalna ravnina: je okomita na P_r i P_s
- **Prednji kut γ_0** je kut između okomice na pravac relativnog kretanja i prednje površine alata ili kut između prednje površine alata i osnovne ravnine
- **Stražnji kut α_0** je kut nagiba stražnje površine alata prema okomici na osnovnu ravninu. Mjeri se u ravnini koja prolazi pravcem relativnog kretanja i okomita je na površinu obrade.
- **Kut klina β_0** je kut između prednje i stražnje površine alata, a mjeri se u ravnini kao i kutovi α_0 i γ_0 s kojima zajedno čini zbroj od 90°
- **Kut nagiba oštrice λ_s** je kut između oštrice alata i ravnine položene kroz vrh alata, a paralelne s osnovnom ravninom. Mjeri se u ravnini koja prolazi kroz glavnu oštricu alata, a okomita je na osnovnu ravninu.
- **Napadni kut κ_r** je kut između projekcije glavne oštrice alata u horizontalnoj ravnini i obrađivane površine.
- **Kut vrha alata ε_r** je kut između glavne i sporedne oštrice alata mjeren na prednjoj površini. Taj kut je uvijek pozitivan [11].



Slika 6. Kinematski koordinatni sustav – tokarski nož [4]



Slika 7. Kinematski koordinatni sustav – glodalo [4]



Slika 8. Kutovi alata za postupke obrade odvajanjem [4]

3.2. Obrada tokarenjem

Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) pretežno rotacijskih (simetričnih i nesimetričnih, okruglih i neokruglih) površina, ali je isto tako i moguća obrada ravnih površina pa i nekih drugih oblika ako su slični rotacijskim tijelima [4].

Izvodi se na različitim vrstama alatnih strojeva, ali pretežito na tokarilicama, pri čemu je glavno (rezo) gibanje kružno, a izvodi ga obradak. Posmično gibanje pridruženo je alatu, u osnovi je pravolinijsko kontinuirano, u pravcu paralelnom osi rotacije obratka (os "z") ili u pravcu okomitom na os rotacije (os "x"). Kada su, u određenom omjeru, uključena posmična gibanja u obadvije osi, nastaje posmično gibanje krivuljnog oblika [4].

Dostavno gibanje vrši alata i služi za primicanje i odmicanje alata obratku. Alat za tokarenje je tokarski nož definirane geometrije reznog dijela, s jednom glavnom reznom oštricom [4].

Tokarenje se može podijeliti na osnovi više kriterija podjele [4]:

1. Prema proizvedenoj kvaliteti obrađene površine:

- Grubo
- Završno
- Fino

2. Prema kinematici postupka
 - Uzdužno
 - Poprečno
3. Prema položaju obrađene površine
 - Unutarnje
 - Vanjsko
4. Prema obliku obrađene površine
 - Okretno
 - Plansko (poprečno)
 - Profilno
 - Konusno
 - Oblikovno (kopirno)
 - Tokarenje navoja
 - Neokruglo

Prikaz i kratak opis nekih od navedenih postupaka tokarenja dani su na slici 9.

Uzdužno tokarenje

- najčešći oblik postupka tokarenja
- posmično gibanje je paralelno s osi obratka i u smjeru osi rotacije
- može biti unutarnje i vanjsko

Poprečno (plansko) tokarenje

- posmično gibanje je radijalno i okomito na os obratka
- može biti unutarnje i vanjsko

Tokarenje navoja

- posmično gibanje je u smjeru osi rotacije i definirano je korakom navoja
- moguće je tokarenje unutarnjih i vanjskih navoja

Konusno tokarenje

- posmično gibanje je pod nekim kutem u odnosu na os rotacije
- može biti unutarnje i vanjsko

Oblikovno tokarenje

- posmično gibanje je u obliku krivulje u odnosu na os rotacije
- može biti:
 - kopirno (putanja alata definirana je putom ticala kopirnog uređaja po šablوني)
 - CNC



Slika 9. Različiti postupi tokarenja (1- uzdužno vanjsko, 2 – CNC oblikovno, 3 - vanjsko poprečno) [14]

Prema postupcima tokarenja potrebno je koristiti adekvatne tokarske noževe. To su alati sa definiranom geometrijom reznog dijela. Mogu biti lijevi ili desni. Tokarski nož se razvijao tijekom dugog razdoblja i stalno se usavršava. Osnovni elementi alata za tokarenje, odnosno tokarskog noža su drška i rezni dio. Drška služi za prihvatanje alata na alatnom stroju i za prijenos sile (otpora) rezanja. Osnova alata je površina koja osigurava pravilan prihvatanje alata na stroju. Rezni dio alata obavlja proces obrade tj. odvajanje čestica.

Alate za tokarenje moguće je izrađivati na dva načina [4]:

1. Tokarski nož izrađen iz jednog komada (slika 10.) te se kao takvi bruse na potreban oblik. Većinom se izrađuju iz brzoreznih čelika.
2. Tokarski nož izrađen iz dva dijela. Drška je izrađena od jeftinijeg i žilavijeg materijala dok je rezni dio pločica koja se pričvršćuje na dršku. Pločica je većinom izrađena od tvrdog metala, cermenta te keramike, a moguće ju je pričvrstiti na nekoliko načina [12]:
 - Lemljenjem pločice
 - Pričvršćivanjem pločice na više načina (slika 11.)



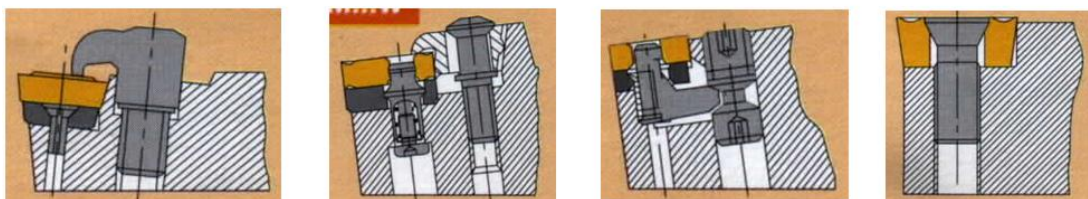
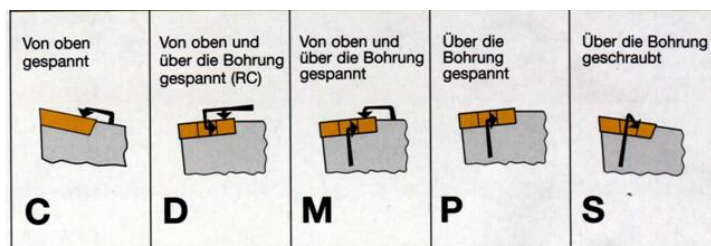
Slika 10. Tokarski nož izrađen iz jednog komada [4]

Današnji rezni alati u postupcima obrade odvajanjem čestica moraju istodobno s jedne strane zadovoljavati zahtjeve za sve većom produktivnošću i ekonomičnošću dok s druge strane moraju biti u mogućnosti obrađivati nove materijale koji se konstantno pojavljuju zbog napretka u znanosti i tehnologiji.

Karakteristike koje rezni alati moraju zadovoljavati kako bi mogli zadovoljiti dovoljno dug vijek trajanja su [9][4]:

- visoka mehanička čvrstoća
- visoka toplinska otpornost na plastičnu deformaciju pri povišenim temperaturama
- kemijska stabilnost
- otpornost na adhezijsko i difuzijsko trošenje
- niska toplinska provodljivost
- otpornost na visoke temperature
- obradivost, niska cijena i dostupnost

Rezni alati su sredstva koja dolaze u direktan kontakt s materijalom kojeg oblikuju te utječu na njegov oblik, točnost i kvalitetu izrade.



Slika 11. Načini stezanja rezne pločice [12]

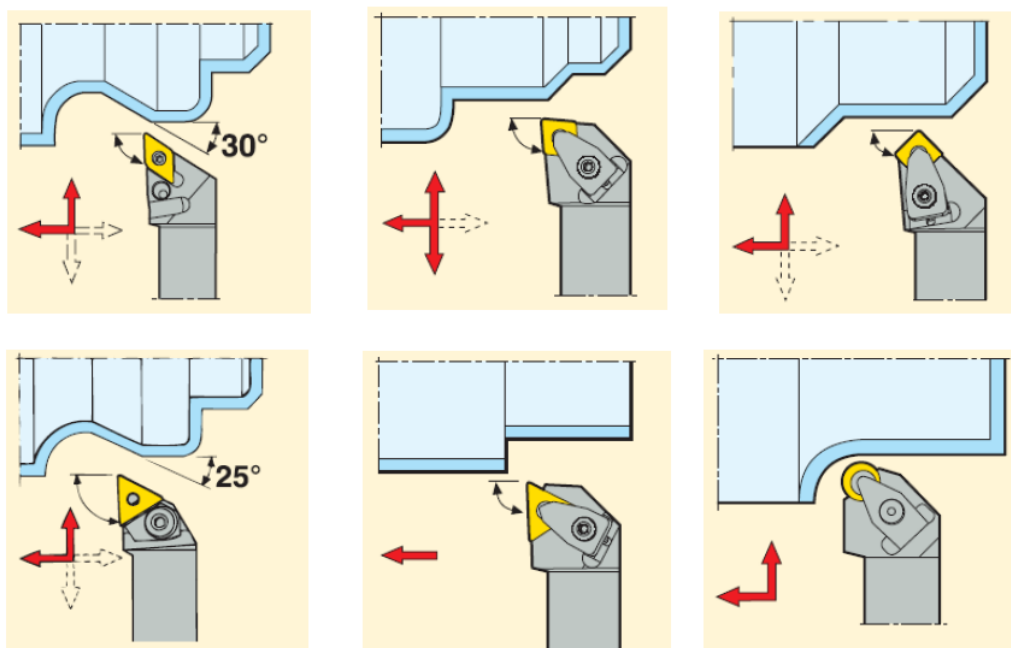
Alat za tokarenje je tokarski nož definirane geometrije reznog dijela, s jednom glavnom reznom oštricom. Danas se za izradu tokarskih noževa koriste brzorezni čelik, tvrdi metal, cerment, keramika, CBN, umjetni dijamant i drugi materijali [4].

Rezne karakteristike većina postupaka tokarenja su slične. Za obradu pojedine površine koristi se samo jedan rezni alat koji je prikazan u poglavlju 2.2. Jednom kad proces rezanja počne, rezna oštrica i obrađivana površina su u stalnom kontaktu dok cijela površina nije obrađena.

Općenito, tokarenje je postupak koji je karakteriziran stabilnim reznim uvjetima, ako izuzmemo početak i kraj rezanja odnosno ulaz i izlaz reznog alata u/iz zahvata. U posebnim slučajevima vanjskog poprečnog tokarenja promjenjiva brzina rezanja će utjecati na temperaturu reznog alata što je posebno izraženo kod obrade obradaka velikih promjera. Kod navedene vrste tokarenja radijalne sile su velike što ponekad može uzrokovati odstupanja obrađene površine i vibracije. Iz tog razloga preporučeno je odabrati alate sa ulaznim kutom između 45° i 75° što će usmjeriti neke sile na steznu glavu i povećati stabilnost.



Slika 12. Oblici reznih pločica [13]



Slika 13. Primjer reznih alata za grubu i finu obradu tokarenjem [4]

Upotreba alata za tokarenje izrađenih iz jednog komada danas je u modernih obradnim CNC centrima rijetka te se naglasak u ovom radu stavlja samo na izmjenjive pločice koje proizvode u različitim oblicima, veličinama, debljinama i prevlakama. Oblik može biti

okrugao, što omogućuje maksimalnu čvrstoću ruba pločice, u obliku dijamanta čime se omogućava oštrim rubovima finu obradu, četverokutni ili višekutni čime se omogućava okretanje pločice kada se jedan rub istroši. Velika većina ima i izrađene lomače kako se ne bi stvorio neželjen oblik odvojene čestice koja utječe na stabilnost i kvalitetu obrade.

Odabir odgovarajućeg držača alata zajedno sa ispravnim oblikom rezne pločice ima znatan utjecaj na proizvodnost, vijek trajanja alata i kvalitetu obrađene površine.

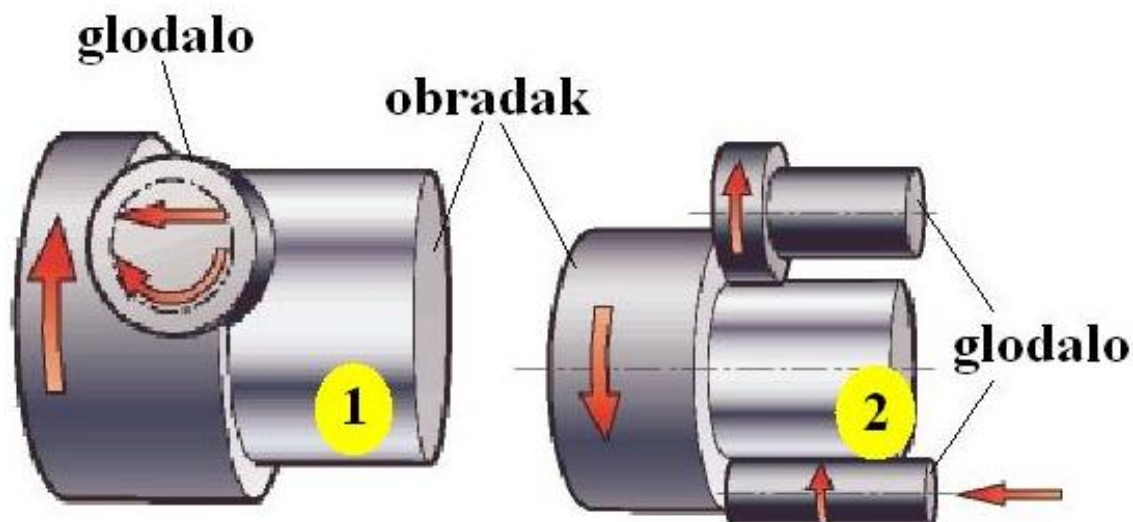
Moderna proizvodnja potaknula je proizvođače reznih alata da još više usavrše rezne pločice što je omogućeno upotrebom sredstva za hlađenje i podmazivanje. Donedavno SHIP se koristio u postupcima tokarenja i još nekim sličnima, ali sada je to omogućeno i u postupku tokarenja.

3.3. Obrada okretnim glodanjem

Okretno glodanje je relativno novi proces obrade odvajanjem čestica koji kombinira dva trenutno najčešće korištena postupka obrade; tokarenje i glodanje. Postupak okretnog glodanja koristi se za obradu općenito cilindričnih (okruglih i neokruglih) površina. Razvilo se iz potrebe za ekonomičnijom, efikasnijom i produktivnijom proizvodnjom. Za razliku od tokarenja, koje koristi samo jednu reznu oštricu u zahvatu, okretno glodanje koristi dvije ili više reznih oštrica s obzirom da se koristi glodalo sa vlastitim prigonom kao rezni alat. Ovakav postupak većinom se izvodio na raznim tokarskim i glodaćim obradnim centrima, ali danas su i za tu učinkovitu tehniku obrade razvijeni posebni tokarsko-glodaći centri koji su detaljnije opisani u 4. poglavlju.

Prve studije o okretnom glodanju počele su još 1990. g. te se postupak, s obzirom na međusobni položaj osi alata i obratka, podijelio na dvije osnovne vrste [2]:

- koaksijalno okretno glodanje
- ortogonalno okretno glodanje



Slika 14. Okretno glodanje (1- ortogonalno, 2- koaksijalno) [14]

Koaksijano okretno glodanje je glodanje kod kojeg su osi alata i obratka međusobno paralelne. Pri tomu razlikujemo obradu vanjskih i unutarnjih površina glodalom koje ima rezne oštrice postavljene po vanjskom ili unutarnjem (obilazno okruglo glodanje) obodu glodala.

Ortogonalno okretno glodanje je glodanje kod kojeg su osi alata i obratka međusobno okomite. Prema međusobnom položaju osi alata i obratka odnosno veličini razmaka među osima (ekscentritetu) razlikujemo centrično i ekscentrično ortogonalno okruglo glodanje, odnosno četiri varijante postupka prema slici 16. [2]:

- Pozicija A $\rightarrow E = 0$,
- Pozicija B $\rightarrow 0 < E < (R_g - l_s)$,
- Pozicija C $\rightarrow E = R_g - l_s$,
- Pozicija D $\rightarrow E = R_g$.

Kinematski gledano ortogonalno okruglo glodanje također može biti [2]:

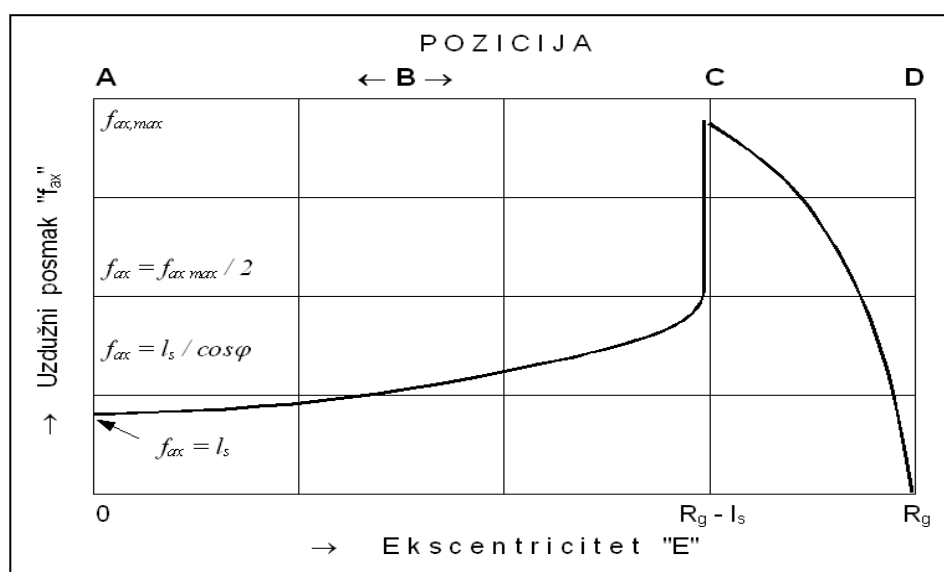
- $n_g \ll n_o$ - kada glavno rotaciono gibanje izvodi obradak, a glodalo izvodi posmično rotaciono gibanje. Postupak je, za sada, ostao samo u sferi eksperimentalnih istraživanja.
- $n_g \gg n_o$ - kada glavno rotaciono gibanje izvodi glodalo, a obradak izvodi rotaciono posmično gibanje. Taj način ortogonalnog okruglog glodanja najviše je istražen i u praksi primijenjen i predmet je istraživanja u ovom radu.

Međusobni položaj alata i obratka, odnosno veličina ekscentra, definira i različitu kinematiku i dinamiku postupka. Prvenstveno se to odnosi na vrijednost maksimalnog aksijalnog posmaka " f_{ax} " koji se može postići i pri kojem još ne nastaju teorijske neravnine na obrađenoj

površini u aksijalnom smjeru obratka. Mogućnost postizanja aksijalnog posmaka u ovisnosti o poziciji postupka, odnosno ekscentricitetu, prikazana je slikom 15.

Kinematski proces ortogonalnog okruglog glodanja vrlo je složen. Pri tome se, prije svega, misli na to da se dijagram brzina mijenja tijekom zahvata oštrice glodala i obratka, a mijenjaju se također i kinematski kutovi obradnog klina [2].

Sve daljnja razmatranja vezana za postupak ortogonalnog okretnog glodanja vezana su uz varijantu obrade za poziciju C (ekscentar).

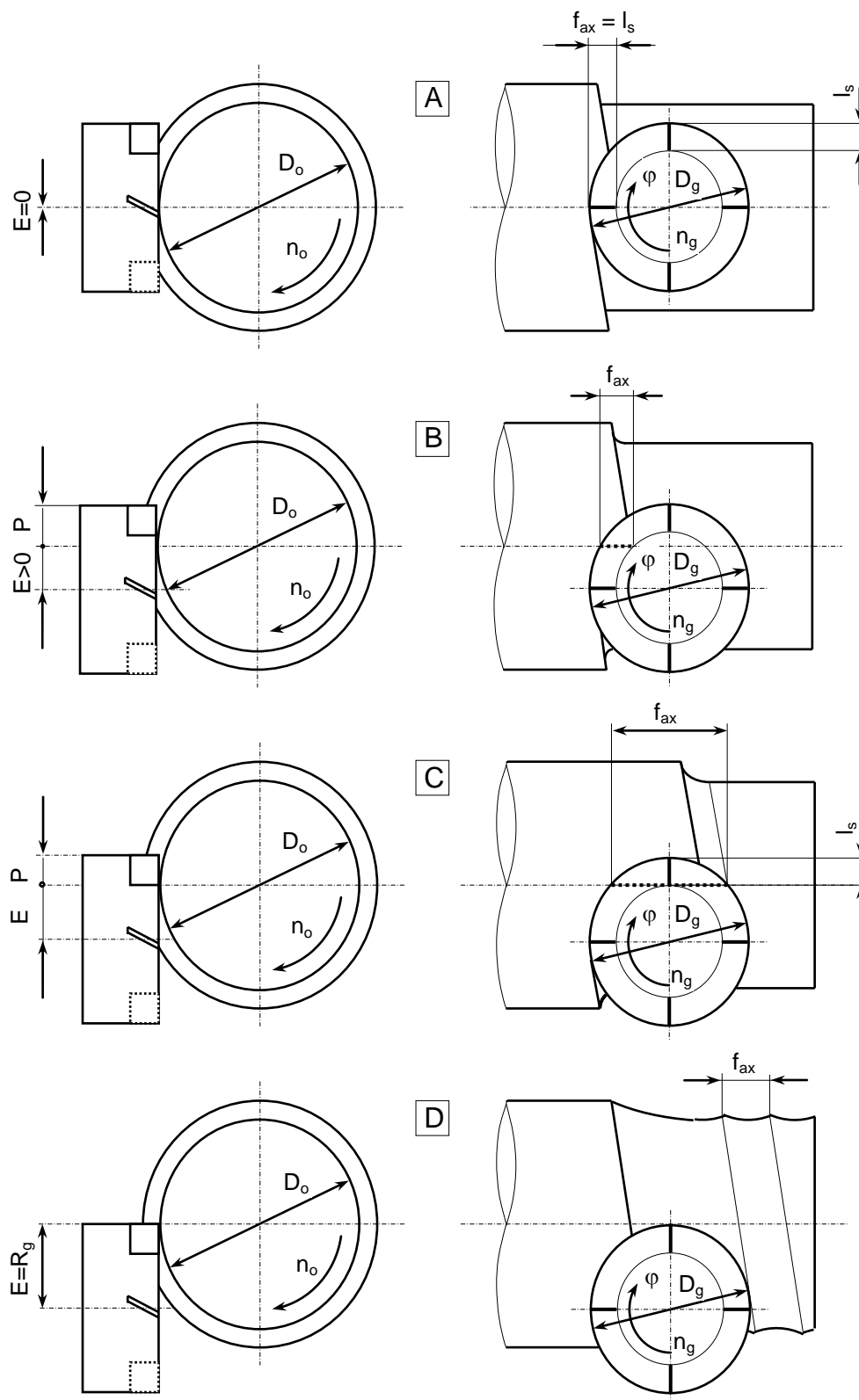


Slika 15. Mogućnost postizanja aksijalnog pomaka u ovisnosti o ekscentricitetu [2]






Glavne prednosti koje je moguće ostvariti okretnim glodanjem su: mogućnost obrade velikih i ekscentričnih komada koji se ne mogu rotirati velikim brzinama, kompleksni oblici, dugačke i nestabilne osovine i vratila te tankostijeni elementi.

Donedavno na tržištu nije bilo velikog izbora alata za obradu materijala odvajanjem čestica ortogonalnim okretnim glodanjem. Ipak, sa mnogim pogodnostima koje takva obrada omogućava, proizvođači alata okrenuli su se istraživanjima i razvili rezne alata i držače alata posebno za tu namjenu. Donedavno za okretno glodanje korišteni su isti rezni alati kao i za postupke obrade tokarenjem. Među prvim firmama koje su krenule se razvojem te vrste alata je SecoTools dok danas dovoljno velik asortiman nude i firme IscarTools i Sandvik Coromant. Uglavnom je taj program alata podijeljen na dvije skupine reznih alata [14]:





- glodala iz standardnog programa (slika 17.) – za grubu i srednju obradu
- glodala iz specijalnog programa (slika 18.) – za finu i završnu obradu



Slika 16. Pozicije ortogonalnog okretnog glodanja[2]

	 CoroMill 390	 CoroMill 390LE	 CoroMill 245	 CoroMill 210	 CoroMill 300
Dubina rezanja (a_p)	++	+++	++	-	+
Širina rezanja (a_e)	++	++	++	-	+++
Posmična brzina (v_f)	++	+	++	+++	+++
Volumen OČ (cm ³ /min)	+	+++	++	+	+++
Kvaliteta obrade	+++	+	+++	-	++
Obrada zahtjevnih materijala	+	+	++	++	+++

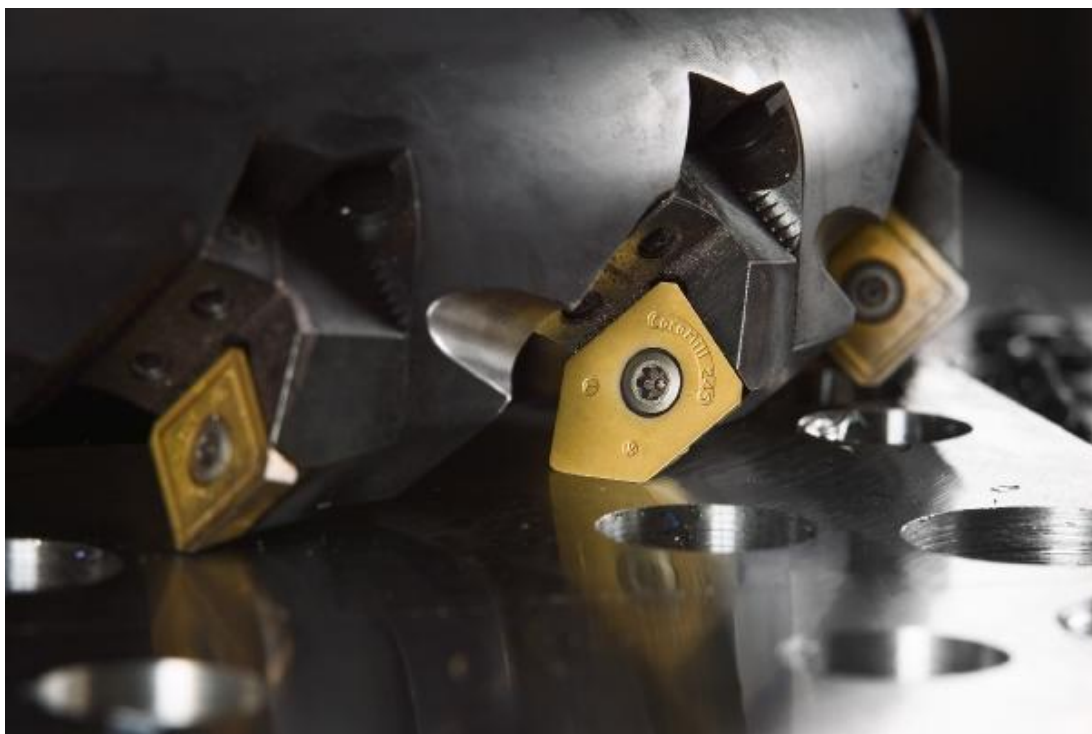
Slika 17. Glodala iz Sandvik Coromant programa za grubu obradu[14]

	 CoroMill Plure	 CoroMill 390	 CoroMill Century (90°)	 CoroMill 300
Dubina rezanja (a_p)	++	+++	++	-
Širina rezanja (a_e)	++	++	++	-
Posmična brzina (v_f)	++	+	++	+++
Volumen OČ (cm ³ /min)	+	+++	++	+
Kvaliteta obrade	+++	+	+++	-
Obrada zahtjevnih materijala	+	+	++	++

Slika 18. Glodala iz Sandvik Coromant programa za završnu obradu[14]

Osnovna značajka glodala za ortogonalno okruglo glodanje je da mora imati barem jednu reznu pločicu ("wiper" pločica) koja ima čeonu reznu oštricu relativno paralelnu s osi obratka. Cilj wiper pločice jest poravnati površinu. Kako su ležišta pločica, kao i same pločice, izrađena sa dimenzijama u toleranciji, svako glodalo posjeduje određeni planski udar. Iz tog razloga samo jedna čeonu oštrica u glodalu određuje dimenziju obratka. To znači da upotreba

glodala sa više od jedne wiper pločice ima smisla samo kod glodala sa puno zubi, ili kod glodala koja imaju mogućnost podešavanja položaja pločice u aksijalnom smjeru. [2].



Slika 19. Prikaz rada 'Wiper' pločice na primjeru [14]

Prilikom ortogonalnog okretnog finog glodanja, kako je i prikazano na slici 19., jedna wiper pločica se koristi kako bi se generirala ravna linija kontakta između rezne oštrice i obrađene površine da bi se dobio cilindrični dio obratka [14].

Proces ortogonalnog okruglog glodanja postavlja visoke zahtjeve na rezni alat, naročito na čeonu reznu oštricu. Glodala i vretena glodačkih jedinki moraju biti dobro uravnoteženih masa, sa minimalnim udarima kako bi se minimizirala mogućnost pojave vibracija. Zbog toga se posvećuje osobita pozornost prednamještanju pločica. Prema radovima [15] i [16], na površini obratka obrađenoj s glodalom koje je imalo planski udar od $\pm 4 \mu\text{m}$ izmjeren je parametar hrapavosti $R_t = 10\text{--}20 \mu\text{m}$. Na površini obratka obrađenoj sa glodalom koje praktično nije imalo planski udar izmjeren je parametar hrapavosti $R_t = 0,4 \mu\text{m}$.

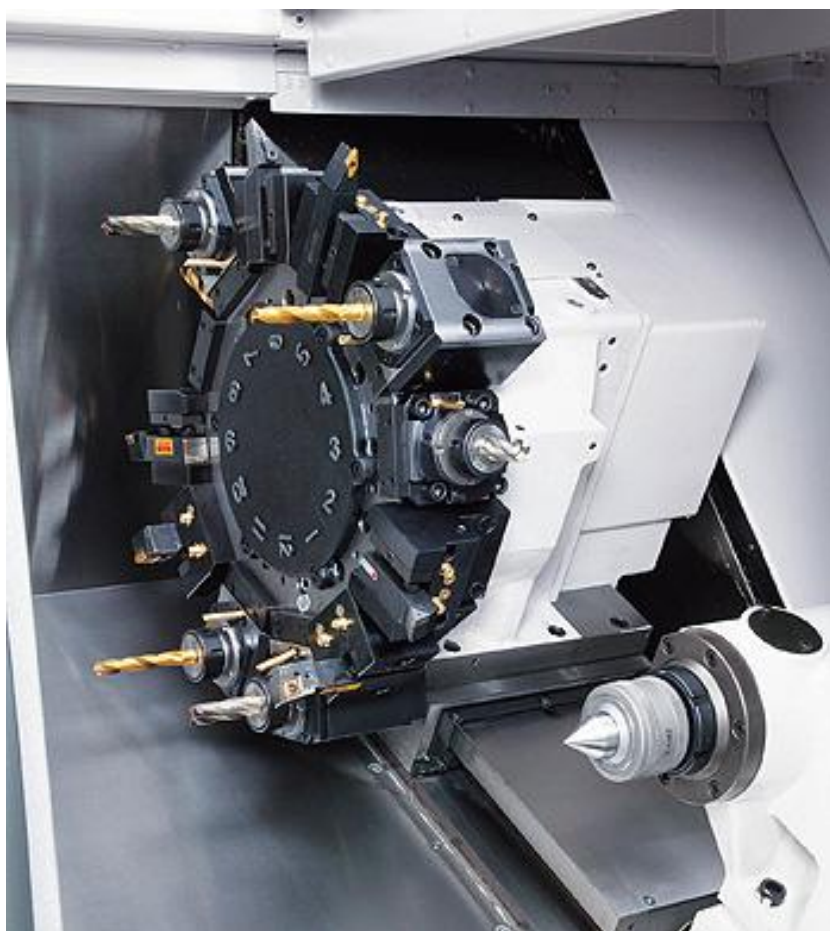
Sve vrste materijala reznih pločica koje se upotrebljavaju pri klasičnom i visokobrzinskom glodanju, poglavlje 3.1.1., preporučuju se i za ortogonalno okruglo glodanje. Pri tomu se za grubu obradu, dakle obradu velikih snaga, preporučuju pločice od prevučenog tvrdog metala. Rezna keramika preporučuje se pri obradi malim presjecima odvojenih čestica i pri uporabi visokih brzina [2].

3.4. Obradni strojevi i primjena

Tokarenje je postupak odvajanjem čestica pod kojim se najčešće podrazumijeva obrada dijelova na tokarilicama. Tokarilice se dijele na: jednostavne tokarilice, univerzalne tokarilice, kopirne tokarilice, planske tokarilice, karusel tokarilice, revolverske tokarilice, CNC tokarilice. No, danas su tokarilice dovedene gotovo do savršenstva te se one jednostavne i univerzalne rijetko koriste u velikoserijskoj i masovnoj proizvodnji. Moderna proizvodnja zahtijeva i strojeve koji će taj napredak pratiti. Iz tog razloga su iz CNC tokarilica dobivene izvedbe tokarskog obradnog centra i tokarsko glodaćeg obradnog centra. Izvedbe čiji nazivi govore o njihovoj primjeni [3][4].

Kod tokarskih centara postoje alati za tokarenje, te pokretni alati za bušenje, glodanje i brušenje što je osnovna razlika u odnosu na CNC tokarilice. Alati s rotacijskim glavnim gibanjem mogu imati vlastiti pogon, ili mogu biti pogonjeni iz zajedničkog izvora kada dođu u radni položaj. Složeni obratci sastoje se od obradnih površina koje se pretežno obrađuju tokarenjem. Međutim, neke od obradnih površina se obrađuju bušenjem, proširivanjem, glodanjem i brušenjem. Da se ovakvi obratci u obradi ne bi selili sa stroja na stroj, što stvara organizacijske i transportne probleme, posebno kod obradaka velike mase, omogućena je obrada svih obradnih površina na jednom stroju i to na horizontalnom ili vertikalnom tokarskom obradnom centru. Danas nisu rijetkost ni tokarski centri sa dvije stezne glave i dvije revolverske glave sa pokretnim i nepokretnim alatima [4].

Spomenuti tokarsko glodaći centri odnosno višenamjenski strojevi imaju prednost u odnosu na tokarske ili glodaće obradne centre jer imaju mogućnost istovremenog korištenja rotacije obradaka i pokretnih alata čime se dobiva još jedna dimenzija obrade kakvo je ortogonalno okretno glodanje. Tada govorimo o višenamjenskim strojevima koji su detaljnije opisani u uvodnom i daljnjem tekstu.



Slika 20. Revolverska glava sa pokretnim i nepokretnim alatima [17]



Slika 21 . Tokarsko-glodaći centar [17]

Prema provedenim istraživanjima ortogonalnog okretnog glodanja, nakon razvoja osnovnih pojmova i značajki postupka, naglasak dan na izradu i razvoj strojeva. Postupak se željelo odmah primijeniti na proizvodnju veliki i glomaznih obradaka neuravnoteženih masa. Danas se ortogonalno okretno glodanje sve više koristi kod obrade obradaka komplicirane geometrije: za dijelove zrakoplova (stajne trapove) i automobila (koljenasta vratila, bregaste osovine), dijelove u energetske industriji [2].

Primjena ortogonalno okretnog glodanja zahtijevala je gradnju novih obradnih strojeva. Najjednostavniji oblik takvog stroja dobiveno je ugradnjom glodaće jedinice sa zasebnim pogonom na suport tokarilice. Prvi takav stroj napravljen je početkom osamdesetih godina na Visokoj tehničkoj školi u Darmstadtu. Ortogonalno okretno glodanje moguće je odraditi i na glodalici ili glodaćem obradnom centru. Potrebno je da stroj ima mogućnost upravljanja u barem četiri osi od kojih je jedna rotacijska (obradak). Osim toga, visoki zahtjevi se postavljaju na krutost kompletnog sustava [2].

Nove koncepcije alatnih strojeva, čiji je razvoj uvjetovan primjenom CNC tehnologije i modularne gradnje te principima nove proizvodne filozofije sažimaju tehnike obrade više konvencionalnih strojeva u jednom stroju. One omogućuju obradu okretnim glodanjem, ali i tokarenjem, glodanjem, bušenjem, izradu navoja itd. Dakle, omogućuje se obrada komada u jednom stezanju sa više različitih operacija za što bi inače trebalo dva, tri ili četiri stroja. Kako je razvoj i primjena fleksibilnih obradnih sustava jedna od mnogih elemenata nove proizvodne filozofije, a obradni centri su osnovni elementi fleksibilnih obradnih sustava tako je i ortogonalno okretno glodanje veliki prilog novoj proizvodnoj filozofiji [2].

Osobitu pozornost privlači obrada velikih, neokruglih, obradaka ekscentričnih masa iz dva razloga [2]:

- takvi obratci se ne mogu okretati velikim frekvencijama vrtnje zbog prevelikih centrifugalnih sila koje onemogućavaju optimalizaciju procesa
- kompletnom obradom na stroju u jednom stezanju štedi se na transportu, međuskladištenju, ponovnom stezanju i centriranju obratka odnosno skraćuje se vrijeme obrade i povećava proizvodnost

Prema današnjim iskustvima s takvim strojevima u proizvodnji te zahtjevima kupaca, za zaključiti je da je budućnost proizvodnje obrade odvajanjem čestica upravo u strojevima za kompletnu izradu pozicija odnosno u – modularnim i višenamjenskim strojevima. Radi se o

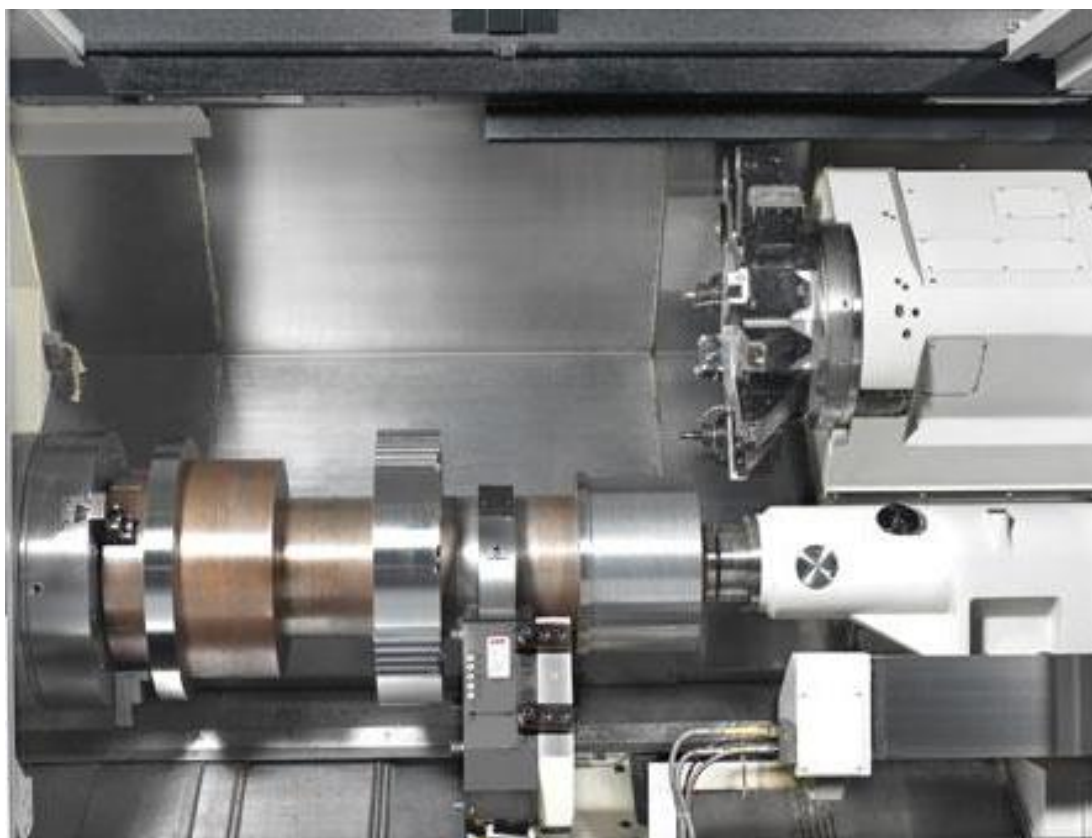
strojevima, obradnim centrima, vrlo širokog izbora operacija koji su potpuno uklapaju u suvremene trendove proizvodnje [2].

Obrada višenamjenskim strojevima koji imaju mogućnost izrade kompletnih pozicija u jednom stezanju pruža slijedeće prednosti u odnosu na obradu na pojedinačnim strojevima odnosno obradnim centrima [18]:

- manji troškovi obrade
- povećana točnost izrade (jedan stroj – jedan proces obrade)
- smanjenja tlocrtna površina proizvodne hale
- povećana produktivnost
- jednostavnije stezanje (samo jedno ili 2 stezanja)
- kompletna obrada cijelog komada (moguća izrada zupčanika, brušenje, poliranje)

Jedan od vodećih proizvođača višenamjenskih strojeva, japanski Mazak, podijelio je strojeve na pet razina [19]:

- 1. razina** (slika 22.): klasičan tokarski obradni centar sa samostalno pogonjenim alatima. Većinom je prva operacija na ovakvim strojevima tokarenje, a kasnije je moguće izvoditi bušenje pa čak i glodanje. Stroj kombinira rotacijsku C-os obratka te X i Z os alata.
- 2. razina** (slika 23.): na postavke sa 1. razine dodaje se Y-os što omogućuje necentričnu obradu u odnosu na obradak te je postupak glodanja puno jednostavnije izvesti.
- 3. razina** (slika 24.): stroj počinje više izgledati kao glodači centar nego tokarski centar. Dodaje se motorvreteno koje ima mogućnost pogonjena glodaćih alata, ali i mogućnost zaustavljanja vrtnje i upotrebe tokarskih alata. Pruža nekoliko prednosti u odnosu na prethodne razine: veća snaga, veći broj alata, bušenje i glodanje pod raznim kutovima u odnosu na os obratka (B-os).
- 4. razina** (slika 25.): omogućena je 5- osna obrada.
- 5. razina** (slika 26.): na 4. razinu nadodaju se operacije puno složenije od glodanja, bušenja i tokarenja – izrada zupčanika, brušenja i sl., a sve ovisno o potrebama kupaca.



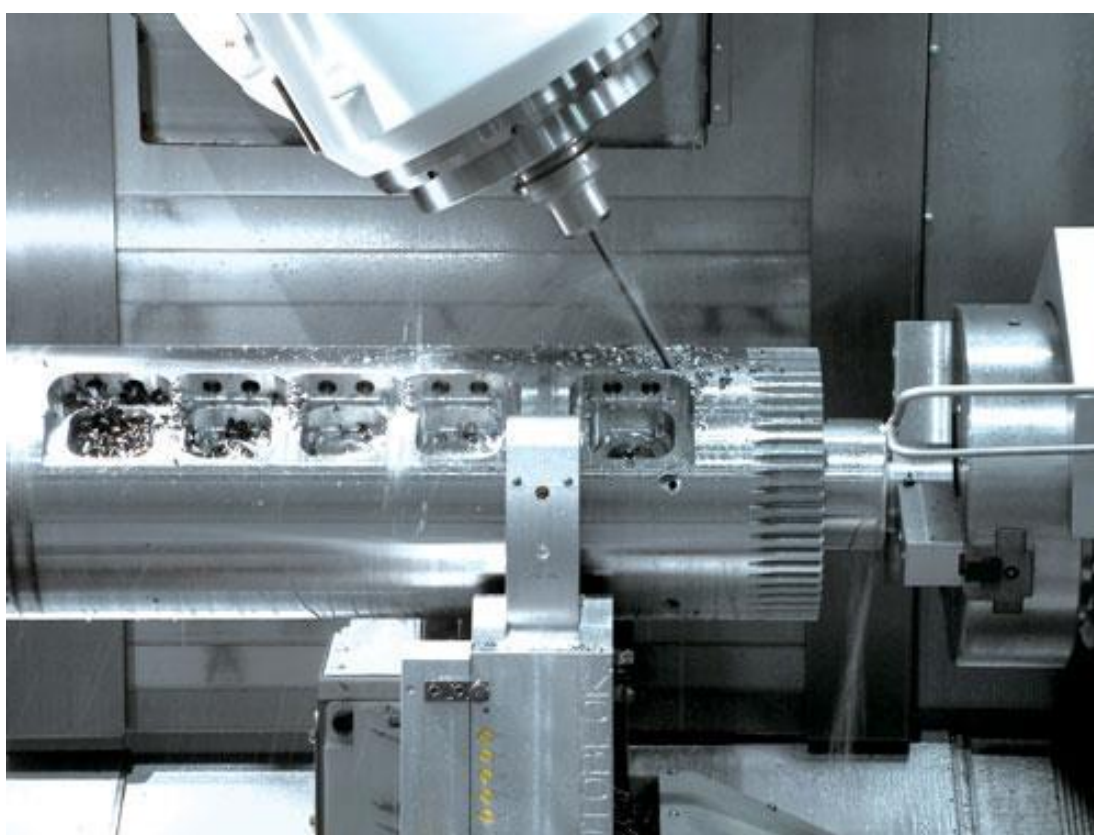
Slika 22. Stroj 1. razine [19]



Slika 23. Stroj 2. razine [19]



Slika 24. Stroj 3. razine [19]



Slika 25. Stroj 4. razine - 5-osna obrada [19]



Slika 26. Stroj 5 razine za složene operacije [19]

Budući da ortogonalno okretno glodanje nije postupak koji se može koristiti u svim situacijama i procesima obrade tako ni navedeni strojevi nisu namijeni isključivo toj vrsti obrade. Ipak, trenutne suvremene izvedbe višenamjenskih i modularnih strojeva omogućavaju upotrebu ortogonalnog okretnog glodanja sa velikom proizvodnošću i završnom kvalitetom obrade nakon koje nije potrebno brušenje i slični postupci obrade. S obzirom da obrada ortogonalnim okretnim glodanjem zahtijeva stroj sa minimalno 4 osi, prema gore navedenim razinama, obratke je moguće ortogonalnim okretnim glodanjem obrađivati već na drugoj razini.

4. KOMPARATIVNA ANALIZA POSTUPAKA TOKARENJA I ORTOGONALANOG OKRETNOG GLODANJA

4.1. Komparativna analiza – definicija

Pojam komparativne analize, kao glavni pojam ovog rada, može se definirati kao: postupak uspoređivanja istih ili srodnih procesa odnosno postupak utvrđivanja sličnosti dvaju procesa za obradu istovjetnih obradaka. U ovom radu, kako je u ovom poglavlju i prikazano, biti će uspoređen jedan već dobro poznati postupak obrade odvajanjem čestica – tokarenje te jedan noviji postupak – ortogonalno okretno glodanje. Biti će uspoređeni najvažnije karakteristike koje se promatraju kod svakog postupka obrade odvajanjem čestica – rezni alati, kakvoća obrađene površine, generirana odvojena čestica, postojanost alata, obradni strojevi te sile rezanja. Na temelju sličnosti i različitosti tih dvaju postupaka biti će donesen zaključak o pogodnosti pojedinog procesa u određenim situacijama. Upravo u tu svrhu se u doktoratu [2] uvodi pojam 'pogodnost obrade' kao tehnološka karakteristika kojom se izražava prikladnost određenog postupka odvajanja čestica za obradu površina točno definiranih karakteristika.

4.2. Postojanost alata

Postojanost alata ili vijek trajanja alata definirana je kao količina reznih karakteristika novog reznog alata sve dok zadovoljavaju postavljene zahtjeve obrade.

Postoje tri mogućnosti definiranja postojanosti oštrice alata [4]:

1. Postojanost definirana vremenom koje alat može provesti u obradi prije nego dođe do istrošenja koje je definirano kao dozvoljena istrošenost alata (kriterijsko trošenje)

2. Postojanost definirana duljinom puta u smjeru glavnog gibanja.

Ovakav način definiranja postojanosti ima prioritet kod postupka provlačenja, dok kod drugih postupaka obrade odvajanjem uglavnom nije u primjeni.

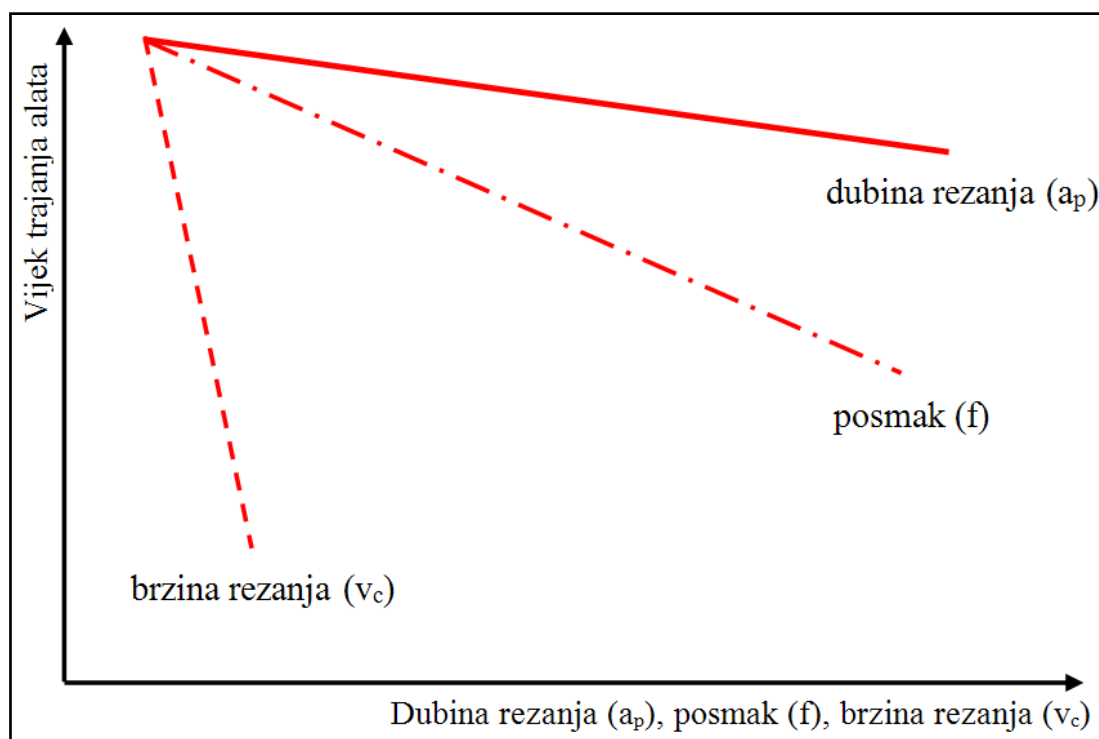
3. Postojanost definirana duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja. Ovakav način definiranja postojanosti ima prioritet kod postupka bušenja (posebno kod obrade bušnih slika), a sve više nalazi primjenu i kod većine drugih postupaka obrade odvajanjem

4.2.1. Trošenje alata

Zastoji u proizvodnji potrebni za promjenu reznog alata ili mjerenje dimenzija obratka imaju direktan utjecaj na proizvodnju kod tokarenja, ali i kod ostalih procesa obrade odvajanjem čestica. Prerana izmjena reznog alata uzrokuje nepotrebne troškove jer udio troškova po proizvodu raste dok pak s druge strane prekasna izmjena alata uzrokuje troškove ponovne izrade cijelog dijela zbog netočnih dimenzija ili tolerancija. Stoga je, radi smanjenja troškova proizvodnje, potrebno odrediti točno (optimalno) vrijeme izmjene alata.

Najutjecajniji parametri na postojanost odnosno trošenje reznog alata su: parametri obrade (brzina rezanja, posmak i dubina rezanja), materijal obratka, snaga stroja te geometrija i materijal reznog alata, sredstvo za hlađenje i podmazivanje i dr.

Slika 27. pokazuje kakav utjecaj imaju tri najvažnija parametra obrade, brzina rezanja, posmak i dubina rezanja, na postojanost reznog alata kod tokarenja. Najmanji utjecaj od ta tri parametra ima dubina rezanja, a koju slijedi posmak. Brzina rezanja se pokazuje kao parametar obrade koji najviše utječe na postojanost alata. Prema tome, da bi se dobilo najbolje rješenje, potrebno ja naći najvišu moguću vrijednost dubine rezanja odnosno posmaka kako bi se smanjilo broj prolaza odnosno vrijeme obrade te smanjiti brzinu rezanja radi povećanja postojanosti reznog alata.



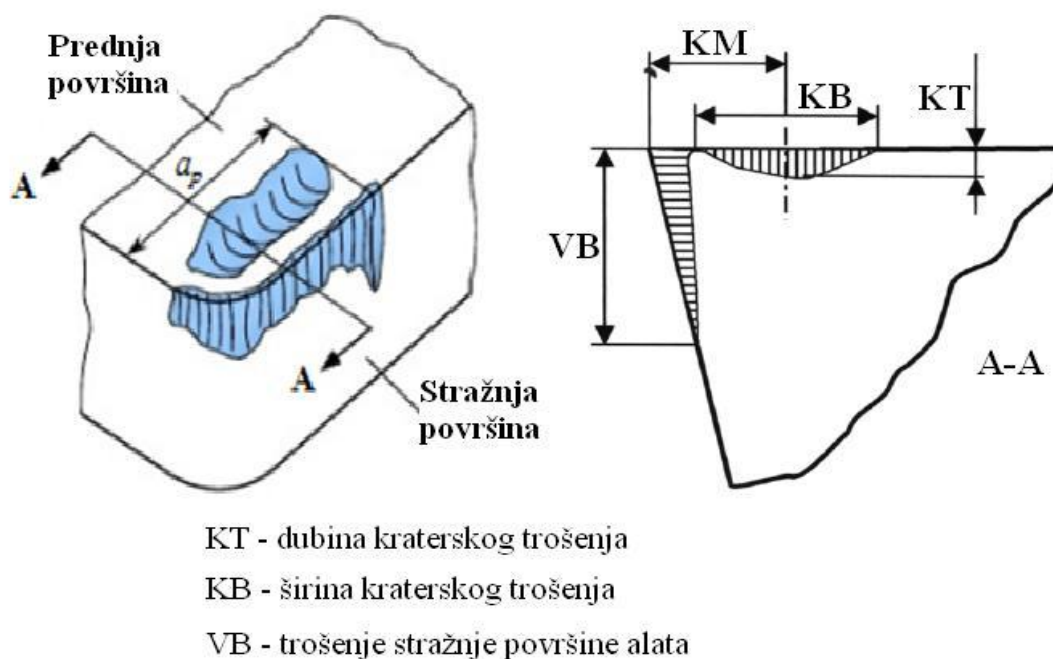
Slika 27. Ovisnost vijeka trajanja alata o dubini rezanja, posmaku i brzini rezanja [14]

Alat koji više ne može obavljati zahtijevanu funkciju dosegao je korisni vijeka trajanja. Ne postoje jednoznačni kriteriji istrošenosti oštice alata već ovise o konkretnoj

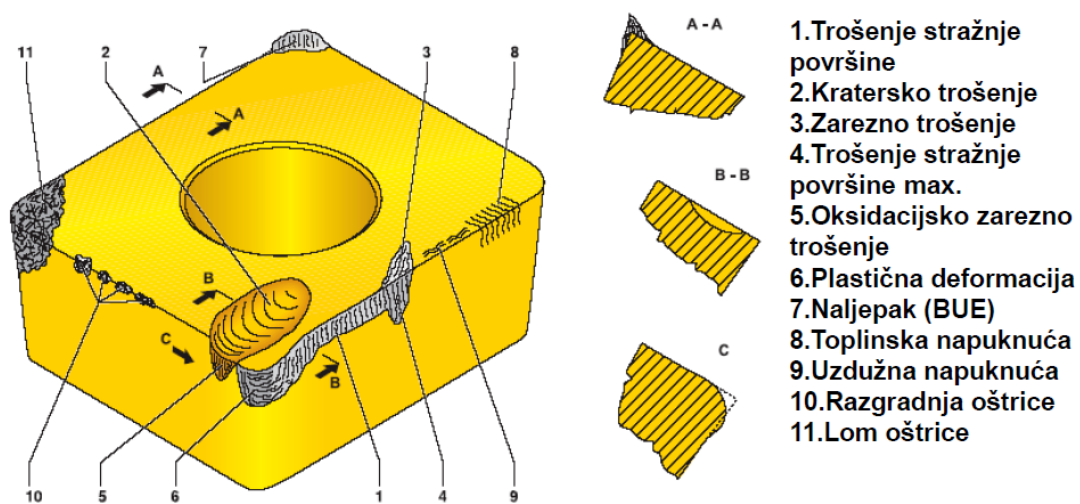
situaciji. Kao kriteriji postojanosti mogu se (sve češće) uzeti vrijednosti parametara obratka (hrapavost i dimenzije) ili mjerljivih veličina procesa (sile, snaga, moment, vibracije,...). Za ocjenu trošenja kod alata s ravnom prednjom površinom dominiraju parametri VB, VB_{max} , KT, KM i KB, a standardi preporučuju samo prva tri. Kod završnih obrada za nadzor trošenja preporuča se trošenje pomoćne stražnje površine, a granična vrijednost ovisi o toleranciji obratka, dok se kod grubih obrada uzimaju parametri VB i KT [4].

Kao kriterij istrošenosti, kod završne obrade, preporuča se parametar hrapavosti obredene površine 'Ra'. Ipak, prioritet pojedinih kriterija istrošenja određuju proizvodne okolnosti i uvjeti obrade [20].

Postoje 2 vrste istrošenja alata koja se lako mogu izmjeriti – kratersko trošenje i trošenje stražnje površine alata. Kratersko trošenje mjeri se maksimalnom dubinom kratera koje stvara odvojena čestica dok se trošenje stražnje površine alata mjeri prosječnom širinom istrošenosti stražnje površine alata kako je prikazano na slici 28. Kada istrošenost dosegne definiranu vrijednost trošenja, alat se smatra neupotrebljivim odnosno da mu je istekao vijek trajanja te ga se baca ili ponovno brusi.



Slika 28. Prikaz kriterija istrošenosti alata [4]



Slika 29. Primjer mogućih oblika trošenja [4]

Početkom 20. stoljeća, F. W. Taylor napravio je niz eksperimenata sa ciljem utvrđivanja postojanosti alata s obzirom na brzinu rezanja kao najutjecajniji parametar obrade. Istraživanja su rezultirala poznatom formulom (1) za utvrđivanje postojanosti (vijeka trajanja) alata.

$$v_c T^m = C_T \quad (1)$$

gdje je:

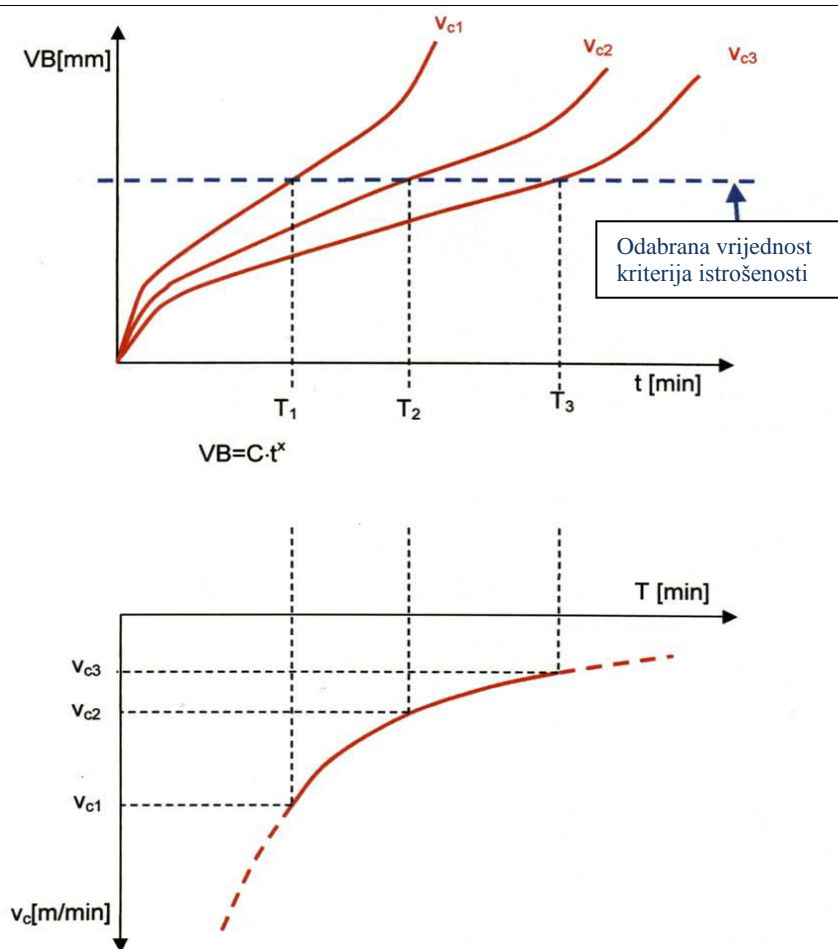
v_c – brzina rezanja

T – vrijeme trajanja alata

m – konstante alata i materijala

C_T – Taylorova konstanta

Ako se u vremenskim intervalima mjeri trošenje alata VB , dobiva se krivulja trošenja kao na slici 30. Povećanjem brzine rezanja uz nepromijenjen posmak i dubinu rezanja dobiju se strmije krivulje trošenja. Primjenom kriterija istrošenosti alata dobiva se podatak o postojanosti alata T_1 , T_2 i T_3 .



Slika 30. Taylorove tipске krivulje trošenja za različite brzine [4]

4.2.2. Trošenje alata kod ortogonalnog okretnog glodanja

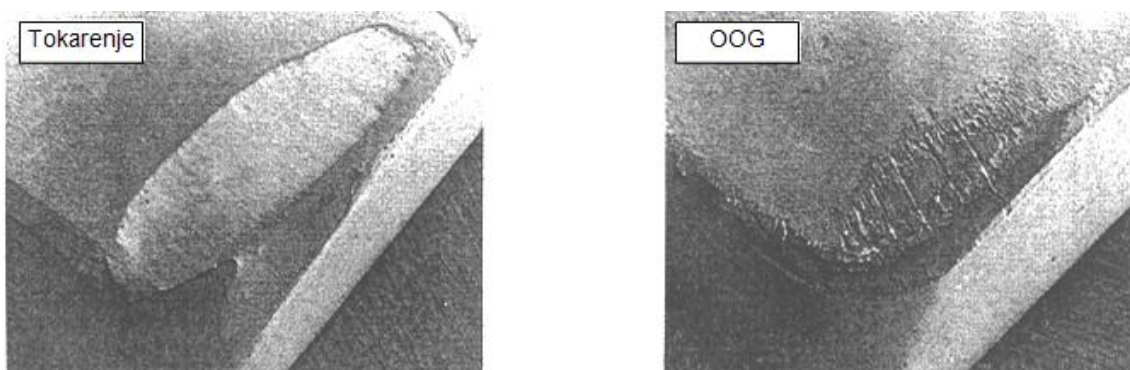
S obzirom da ortogonalno okretno glodanje relativno noviji postupak obrade, do sada još nisu provedena detaljnija istraživanja na temu utjecaja parametara obrade na postojanost alata niti je njihov utjecaj matematički opisan. Iako postoje alati posebno za namjenu ortogonalnog okretnog glodanja, proizvođači alata nisu objavili provedena istraživanja tako da se u proizvodnji većinom koriste spoznaje iz klasičnog glodanja. Ono što je poznato i dostupno su istraživanja koje je prezentirao W. Konig u svojim radovima [16] i [21]. Istraživanja koja je proveo odnose se na istosmjernu i protusmjernu varijantu postupka te je mjerio maksimalnu i prosječnu širinu pojasa istrošenja stražnje površine rezne pločice. Rezultat je bio jednak kao i kod ravnog istosmjernog glodanja – rezna pločica pokazuje manji intenzitet istrošenja. Čeona oštrica pokazuje veći stupanj istrošenja u odnosu na obodnu oštricu iako je kraće u zahvatu.

U drugom istraživanju dao je komparativne rezultate trošenja alata za tokarenje i ortogonalno okretno glodanje, za poziciju ekscentar, pri istim uvjetima obrade. Rezultati su prikazani u tablici 1. [2].

	Tokarenje	O.O.G. - ekscentrično
<i>Obradak</i>	Ck 45 N, $D_o = 140 \text{ mm}$	
<i>Uvjeti obrade</i>	$v_c = 180 \text{ mmmin}^{-1}$ $f = 0,32 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$	$v_c = 194 \text{ mmmin}^{-1}$ $f_z = 0,31 \text{ mm}$ $a_p = 2 \text{ mm}$ $D_g = 315 \text{ mm}$ $z_g = 1$
<i>Alat</i>	Tvrdi metal P 25 + prevlaka TiN	
	$\gamma = 5^\circ$ $\alpha = 6^\circ$	$\gamma_{ob} = 0^\circ$, $\gamma_{\check{c}e} = 5^\circ$, $\alpha = 6^\circ$
<i>Specifični volumen odvojenih čestica</i>	$115 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$	$236 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$
<i>Istrošenje alata pri $T = 19 \text{ min}$</i>	Potpuno istrošenje	Djelomično pucanje prevlake

Tablica 1. Istrošenje alata pri obradi tokarenjem i ortogonalnim okruglim glodanjem, pozicija ekscentar, pri istim uvjetima obrade [21]

Veće trošenje rezne oštrice pri obradi tokarenjem može se tumačiti puno bržim zagrijavanjem rezne oštrice jer je u stalnom kontaktu s površinom rezanja za razliku od procesa glodanja. Isto tako hlađenje oštrice je otežano zbog stalnog kontakta te tekućina ne može doći direktno do oštrice što ima za posljedicu brže trošenje alata. Kod glodala, koje ima 2 ili više reznih oštrica, hlađenje (tekućinom ili zrakom) je omogućeno jer se oštrice u zahvatu izmjenjuju i nisu u stalnom zahvatu. Osim što je smanjeno trošenje omogućene su i veće brzine obrade, a time i veća proizvodnost. Primjer trošenja pri obradi tokarenjem i ortogonalnim okretnim glodanjem prema provedenim istraživanjima [21] prikazan je na slici 31.



Slika 31. Istrošenje alata pri obradi tokarenjem i ortogonalnim okruglim glodanjem, pozicija ekscentar, pri istim uvjetima obrade [21]

4.3. Generiranje i oblik odvojene čestice

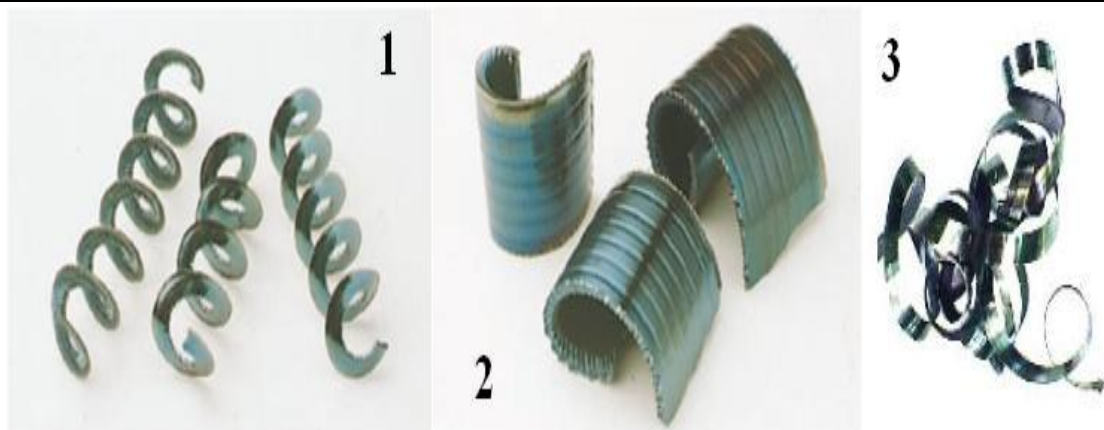
Kada je u pitanje generiranje odvojene čestice jedno je sigurno: bez kontrole i poznavanja oblika odvojene čestice neće biti niti kontrole nad troškovima obrade, vijeku trajanja alata i kvaliteti obrađene površine što narušava ekonomičnost i sigurnost procesa obrade. Interpretirajući veličinu, oblik, boju i smjer odvojene čestice moguće je vrlo jasno vidjeti efikasnost reznog alata i stroja [20].

Proces stvaranja odvojene čestice jednak je za gotovo sve procese obrade te je iz tog razloga istraživao kako bi se jasno unaprijed mogla odrediti brzina, posmak i dubina obrade te ostali parametri obrade za svaki proces, a što se prije određivalo prema 'osjećaju' tehnologa.

4.3.1. Odvojena čestica kod tokarenja

Oblik odvojene čestice ovisan je o nizu različitih parametara: karakteristike materijala obratka, brzina rezanja, posmak, dubina rezanja, oblik reznog dijela alata, stanje oštrice, vibracije i sl. Ipak, prema [11] i vanjskom izgledu odvojenu česticu možemo podijeliti na:

1. **Diskontinuirani (lomljeni) oblik** – nastaje pri obradi krutih materijala te kod obrade malim brzinama rezanja, velikim debljinama i s malim kutom prednje površine alata. Nastajanjem ovakve odvojene čestice površine nije idealna glatka tako da se ovakav oblik dobiva kod grube obrade.
2. **Kontinuirani (tekući) oblik** – oblik čestice nakon kojeg nema primjetnih tragova ravnine smicanja te je kvaliteta površine znatno bolja nego kod diskontinuirane odvojene čestice. Postiže se velikim brzinama rezanja, malim debljinama te velikim kutom prednje površine alata.
3. **Nasječeni (lamelarni) oblik** – oblik koji je kombinacija kontinuiranog i diskontinuiranog oblika odvojene čestice odnosno lomljeni segmenti se ne odvajaju već ostaju spojeni ako tekući oblik, ali ipak je moguće vidjeti svaki puknuti segment.



Slika 32. Najčešći oblici odvojene čestice (1 - povoljan oblik za fino tokarenje, 2 - povoljan oblik za grubo tokarenje, 3 - nepovoljan oblik) [20]

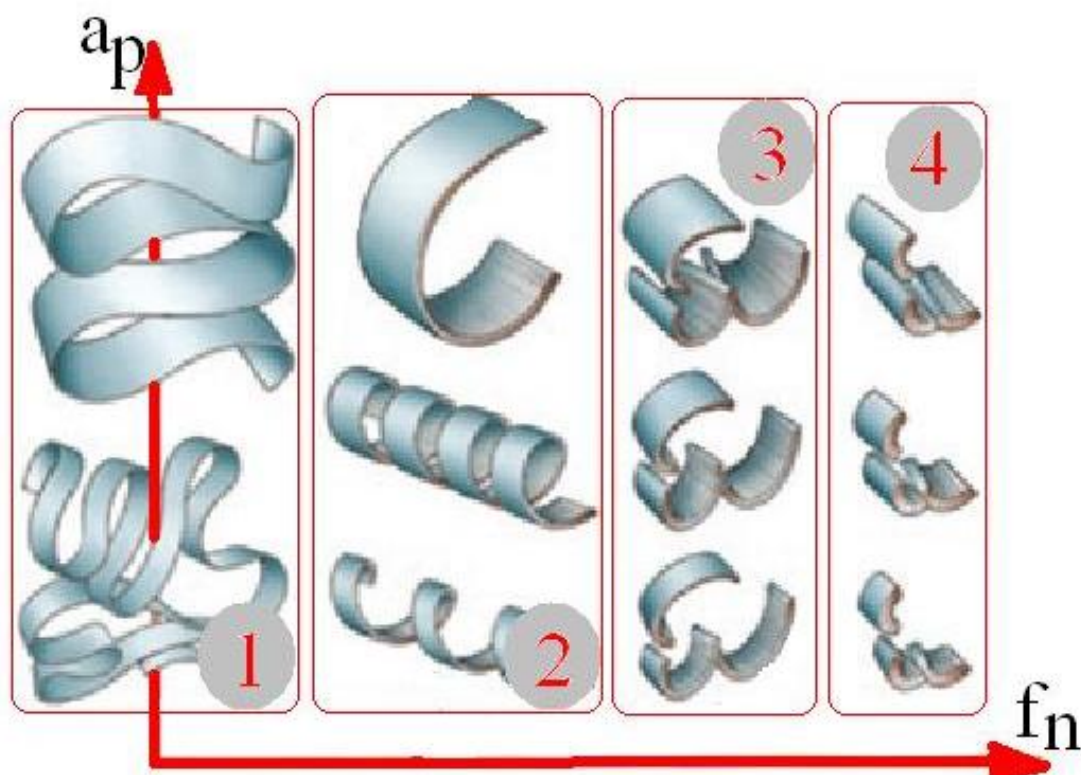
Tokarenje je trenutno razvijeno do te razine gdje nije samo bitna vrlo velika brzina obrade već i ostali parametri koji se strogo kontroliraju kako bi krajnji proizvod bio kvalitetan i pouzdan. Odvojena čestica reže se na kontroliran način sa odabirom ispravnih parametara od kojih su najvažniji posmak i dubina rezanja te prednji kut rezne oštrice. Bez pravilno odabranih parametara obrade vrlo vjerojatno bi se u procesu brzo formirala nekontrolirana duga, tanka tekuća odvojena čestica (slika 32.) koja je nepovoljna i za vijek trajanja alata i kvalitetu obrađene površine [20].

Posmak, u kombinaciji sa lomačima čestica, ima mogućnost kontrole oblika odvojene čestice. Lomači omogućavaju lomljenje čestica na različitim dubinama i posmacima. Ako je posmak premali generirati će se dugačka čestica koja se neće moći odlomiti sama, a ako je pak posmak prevelik generirati će se debela odvojena čestica koja dovodi do kraterskog trošenja ili još gore do puknuća rezne oštrice. Uz to je i potrošnja snage puno veća. Dakle, potrebno je osigurati pomak i dubinu rezanja koju je preporučio proizvođač alata za pojedini materijal [22].

Osim parametara obrade na oblik odvojene čestice znatno utječe i prednji kut i radijus oštrice alata. Prednji kut alata utječe na smjer, debljinu i duljinu odvojene čestice. Manji kutovi (90°) zahtijevaju veću silu te generiraju kraću i širu odvojenu česticu. Veći kutovi ($30-45^\circ$) s druge strane rezultiraju finiju česticu koja se manje uvija te za čije je generiranje potrebno manje snage i manje sile. Kut od 45° raspoređuje sile jednako u radijalnom i aksijalnom smjeru. Za grubu obradu najbolji izbor je okrugla pločica zbog velike čvrstoće, a za završnu obradu najpogodnija je trokutasta pločica [22].

Radijus ima i velik utjecaj kada se mijenja dubina obrade. U slučaju kada je omjer dubine rezanja (a_p) i radijus oštrice (r_e) mali, tada je radijus glavni dio rezne oštrice s čime se

generira spiralna odvojena čestica. S većim dubinama, utjecaj radijusa je manji te se generira spiralna odvojena čestica koja ima tendenciju generiranja prema van [14].



Slika 33. Ovisnost oblika odvojene čestice o dubinu obrade i posmaku [14]

Kako je i prikazano na slici 33. odvojena čestica kod tokarenja može imati različite oblike pa je prema tome i podijeljena u 4 grupe [23]:

1. nepovoljna – $k_{o\check{c}}=60 - 400$ (duga i tanka tekuća)
2. prihvatljiva – $k_{o\check{c}} = 45 - 60$ (dugi zavoji malog promjera)
3. pogodna – $k_{o\check{c}} = 10 - 45$ (kratki zavoji i spirale)
4. pogodna – $k_{o\check{c}} = 5 - 10$ (duža i kratka iverasta)

gdje je:

$$k_{o\check{c}} = \frac{V_{o\check{c}}}{V_M} \quad (2)$$

$V_{o\check{c}}$ = volumen koji zauzima odvojena čestica

V_M = volumen dijela obratka koji je pretvoren u odvojenu česticu.

4.3.2. Odvojena čestica kod ortogonalnog okretnog glodanja

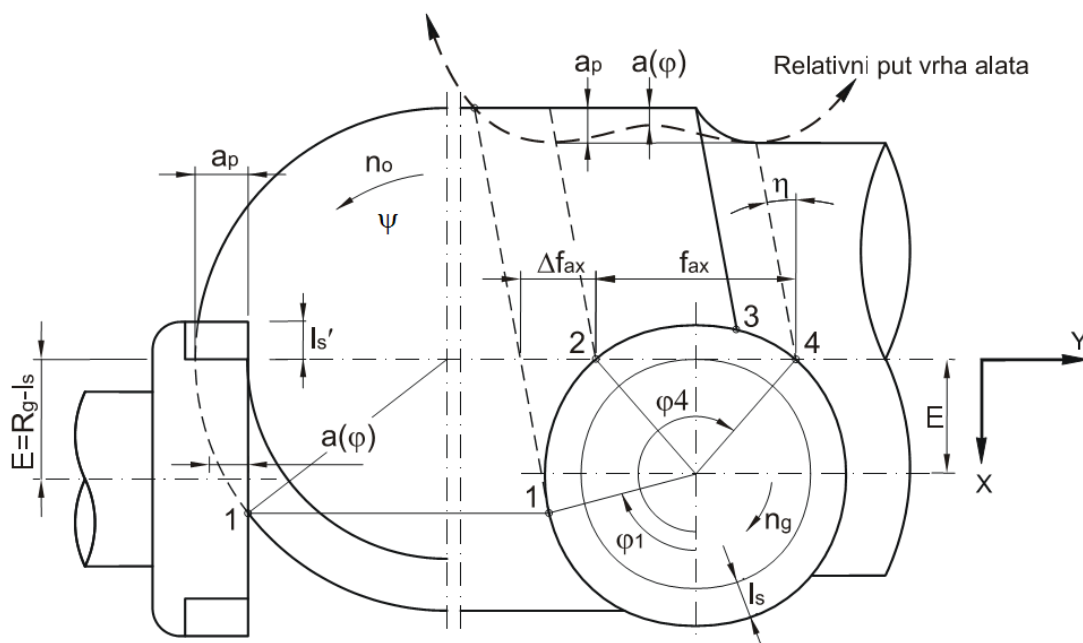
Vrlo složeni rad rezne oštrice bitna je činjenica koja razlikuje naizgled dva gotovo ista postupka – ortogonalno okruglo glodanje i plansko čeono glodanje.

Obodna rezna oštrica prva ulazi u zahvat i to na neobrađenoj površini (točka 1. na slici 34.) pri čemu je trenutačna dubina obrade " $a(\varphi)$ " vrlo mala i vrlo često jednaka nuli. Položaj točke 1, odnosno kut početka zahvata " φ_1 ", određen je dubinom obrade " a_p " i promjerom obratka, kako to pokazuje izraz (3) [2]:

$$a(\varphi) = a_p - R_o (1 - \cos \psi) \quad (3)$$

pri čemu je:

$$\sin \psi = \frac{E + R_g \cos \varphi}{R_o} \quad (4)$$



Slika 34. Odnosi zahvata alata i obratka kod ekscentričnog ortogonalnog glodanja [2]

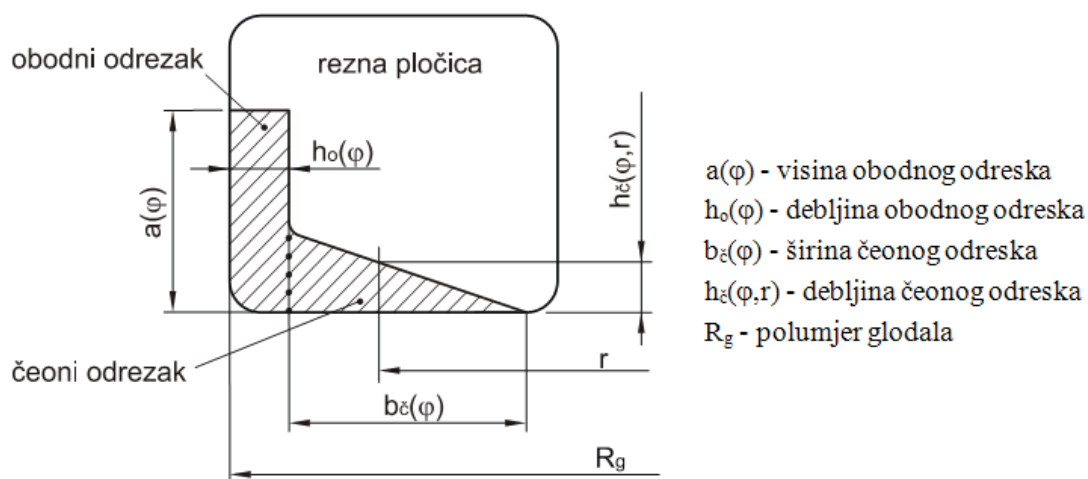
To znači da je dubina obrade na početku zahvata mnogo manja od zadane. U daljnjem radu dubina obrade se povećava, kao i debljina odvojene čestice, pa se i rad obodne oštrice povećava. Tek kada dođe na zadani promjer obrade (točka 2. na slici 34.) rezna oštrica nalazi se na zadanoj dubini obrade, a u rad se uključuje čeona oštrica. Čeona oštrica dalje se kreće po izvodnici obratka i tako definira promjer obrađene površine. Pri tome ona obavlja sve veći rad, koji je pri kutu zahvata od 180° najveći, a nakon toga se postupno smanjuje. Obodna oštrica,

nakon točke 2., na daljnjem putu k izlasku iz zahvata obavlja sve manji rad jer se dubina obrade postupno, a nakon točke 3. i naglo smanjuje k nuli (na izlasku iz zahvata). Karakteristika procesa je, dakle, postupni rast opterećenja na reznjoj oštrici nakon ulaska u zahvat i postupno smanjivanje opterećenja pri izlasku iz zahvata [2].

Složeni kinematski proces ortogonalnog okruglog glodanja ima za posljedicu i karakterističan presjek odvojene čestice (slika 35.), koji se neprestano mijenja tijekom zahvata, odnosno vremena. Uz konstantne sve uvjete obrade presjek odvojene čestice je tako funkcija zahvatnog kuta [2].

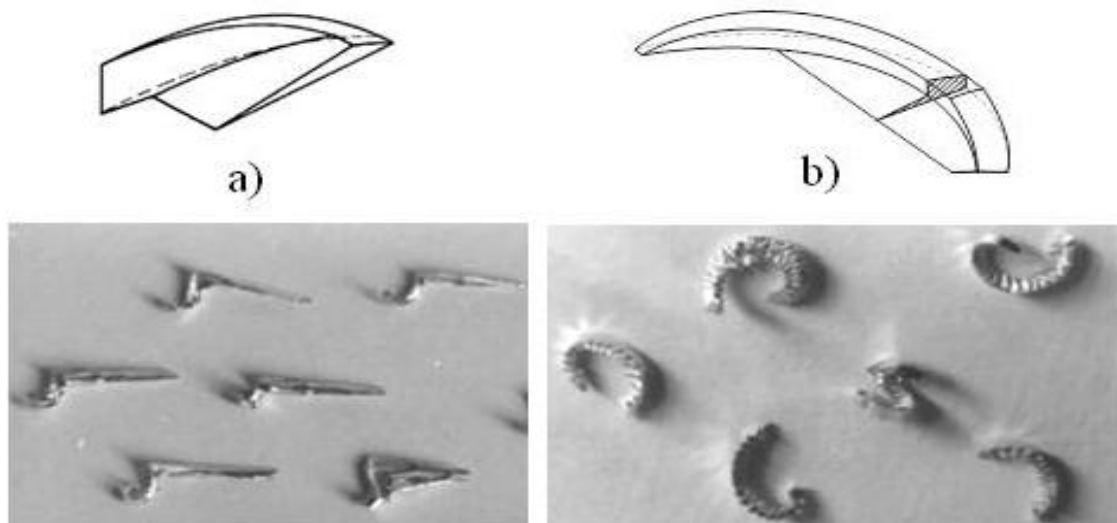
Presjek odvojene čestice, prema slici 35., sastoji od dva dijela:

- dijela koji stvara obodna oštrica, obodni odrezak: $A_{ob} = a(\varphi) h_o(\varphi)$
- dijela koji stvara čeona oštrica, čeoni odrezak: $A_{če} = b_{če}(\varphi) h_{če}(\varphi, r)/2$.



Slika 35. Teoretski oblik odvojene čestice kod ortogonalnog okretnog glodanja – pozicija ekscentar [2]

Kako prikazuje slika 36. odvojena čestica kod ortogonalnog okruglog glodanja, po istoj klasifikaciji od [23] svrstava se u: *pogodna* - $k_{oc} = 5 - 10$ (*duža i kratka iverasta*).



Slika 36. Teorijski i stvarni oblik odvojene čestice kod ortogonalnog okruglog glodanja: a) pozicija centar, b) pozicija ekscentar [2]

4.4. Kakvoća obrađene površine

4.4.1. Teorijska hrapavost površine kod tokarenja

Kod procesa tokarenja moguće su, prema [4], 2 varijante izgleda površine koje je nastala nakon obrade tokarskim nožem:

- **bez radijusa vrha oštrice ($r_e=0$)** gdje će teorijska visina neravnina ovisi o kutovima samog alata (κ_r i κ_r') što će u daljnjem tekstu biti dokazano.

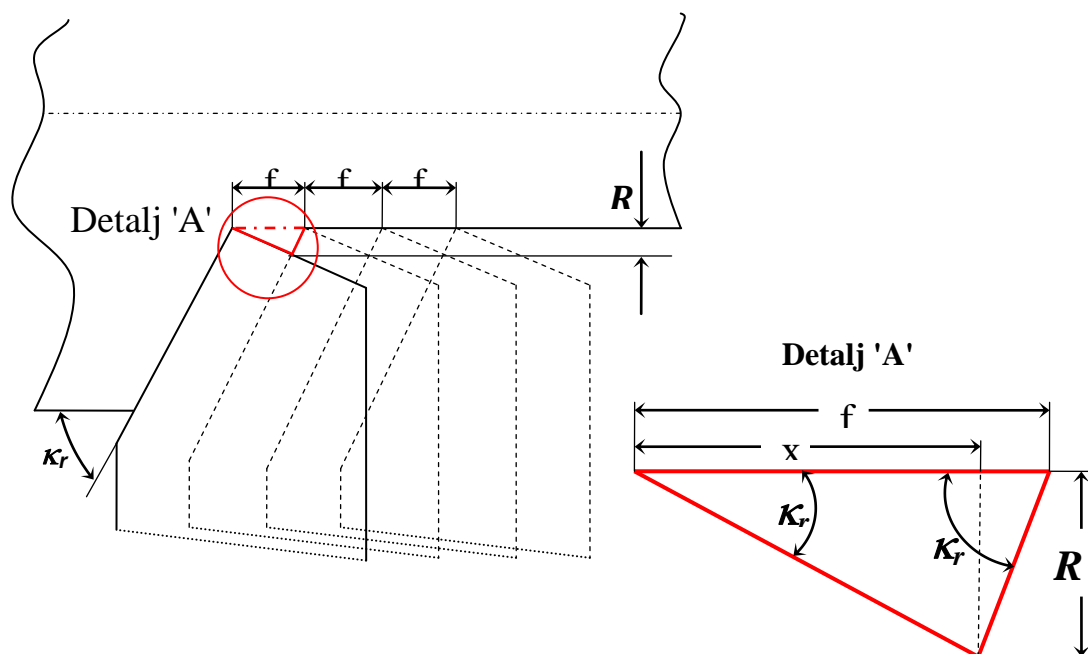
Prikazom detalja 'A' prema [4] na slici 37. posmak će biti definira kao

$$f = x + (f - x) \quad (5)$$

dok su kutovi κ_r i κ_r' definirani izrazima:

$$\operatorname{tg} \kappa_r = \frac{R_t}{f - x} \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \kappa_r' = \frac{R_t}{x} \quad (7)$$



Slika 37. Izgled obrađene površine nakon prolaza alatom bez radijusa vrha alata [4]

Daljnjom transformacijom izraza (6) i (7) dobiva se

$$(f - x) = \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r} \quad (8)$$

$$x = \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r'} \quad (9)$$

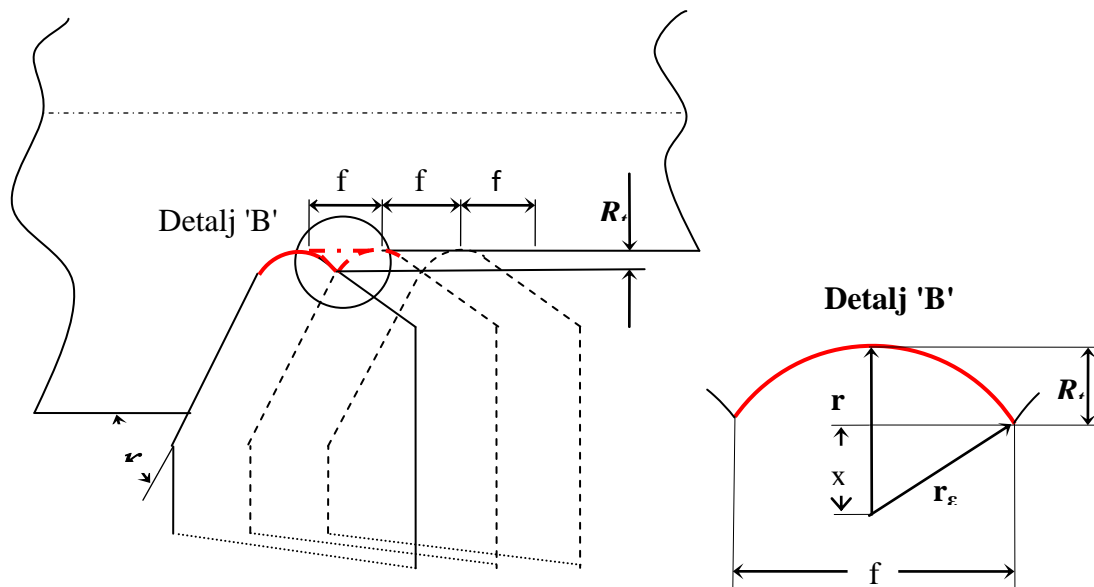
Uvrštavanjem izraza (8) i (9) u (5) te njegovim sređivanjem dobiva se konačan izraz za izračun teorijske visine neravnina prilikom tokarenja upotrebom alata bez radijusa vrha:

$$f = \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r} + \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r'} \quad (10)$$

$$R_t = f \frac{\operatorname{tg} \kappa_r \operatorname{tg} \kappa_r'}{\operatorname{tg} \kappa_r + \operatorname{tg} \kappa_r'} \quad (11)$$

- **alatom sa radijusom vrha alata ($r_e > 0$)**

Slikom 38. prikazan je postupka tokarenja sa radijusom oštice vrha alata. Detaljnijim prikazom vidljiv je oblik površine koji nastaje nakon prolaza tokarskog noža. Poznavajući geometriju alata moguće je dati dovoljno približne izraze za izračunavanje teorijske visine neravnina.



Slika 38. Izgled obrađene površine nakon prolaza alatom sa radijusom vrha alata [4]

Prema detalju 'B' iz [4] na slici 38. vrijede izrazi:

$$x^2 = r_\epsilon^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2 \quad (12)$$

$$x = r_\epsilon - R_t \quad (13)$$

Uvrštavanjem (13) u (12) dobivamo izraz

$$(r_\epsilon - R_t)^2 = r_\epsilon^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2 \quad (14)$$

gdje se daljnjim kvadriranjem dobiva :

$$r_\epsilon^2 - 2R_t r_\epsilon + R_t^2 = r_\epsilon^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2 \quad (15)$$

U ovom slučaju izraz se može dosta pojednostavniti ako se uzima pretpostavka da je $R_t^2 \approx 0$ i to zbog toga jer se teorijska visina neravnina mjeri u mikrometrima, a ako se takav izraz još i kvadrira realno je za pretpostaviti da će ta vrijednost biti dovoljno mala da se može zanemariti. Uz takvu pretpostavku dobiva se konačan izraz za približan izračun teorijske visine neravnina:

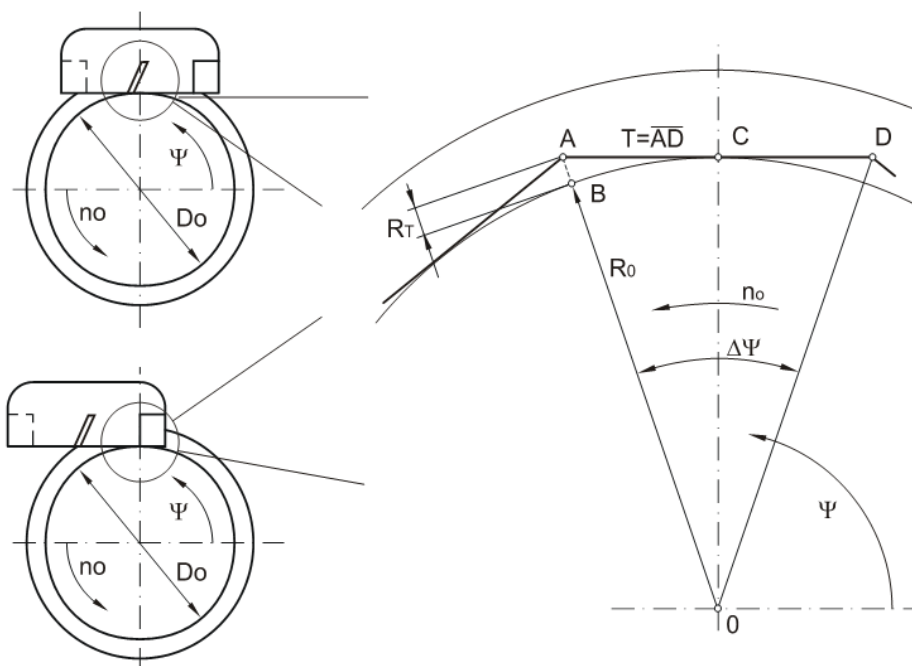
$$R_t = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} \quad (16)$$

Što govori da će teorijska visina neravnina (hrapavost) ovisiti o kvadratu posmaka kao jednom od parametra obrade te o radijusu vrha alata koji se koristi. Budući da su dane neke pretpostavke kako bi konačna formula bila što jednostavnija, a opet dovoljno točna da daje približnu predodžbu o veličini hrapavosti koju ćemo postići, jasno je da postoje razlike u teorijskoj hrapavost i onoj stvarnoj koja je izmjerena nakon proces obrade tokarenjem.

4.4.2. Teorijska hrapavost površine kod ortogonalnog okretnog glodanja

Postupci ortogonalnog okruglog glodanja ne ostvaruju idealno kružni, odnosno cilindrični poprečni presjek obratka. Kako je to prikazano na slici 39., poprečni presjek obratka ima poligonski oblik, a vrhovi poligona čine odstupanje od kružnosti, odnosno geometrije obrađene površine. Uobičajeno je da se takva odstupanja, definirana kinematikom procesa i parametrima zahvata odvajanog sloja, a za praksu interesantne parametre režima obrade, nazivaju teorijska visina neravnina ili teorijska hrapavost " R_T ".

Slika 39. pokazuje da centrično i ekscentrično ortogonalno okruglo glodanje ostvaruju, u identičnim okolnostima, identičan poprečni presjek obratka, pa su i odstupanja od kružnosti, odnosno teorijska visina neravnina, identična [2].



Slika 39. Izgled obrađene površine nakon prolaza glodala postupkom ortogonalnog okretnog glodanja [2]

Iz trokuta ACO na slici 39. može se napisati:

$$R_o^2 + \left(\frac{T}{2}\right)^2 = (R_o + R_T)^2 \quad (17)$$

$$T = R_o \operatorname{tg}(\Delta\psi) \quad (18)$$

Središnji kut poligona je u praktičnoj uporabi vrlo mali, reda veličine maksimalno jednog stupnja, pa se može pisati:

$$\operatorname{tg}(\Delta\psi) = \Delta\psi = \frac{2 \pi n_o}{n_g z_g} \quad (19)$$

Uvrštavanjem ovog izraza u (17) dobije se teorijska visina neravnina:

$$R_T = \frac{R_o}{2} \left(\frac{\pi n_o}{n_g z_g} \right)^2 \quad (20)$$

Daljnjom transformacijom izraza (20) može se pisati:

$$R_T = \frac{1}{8 R_o} \left(\frac{D_o \pi n_o}{n_g z_g} \right)^2 \quad (21)$$

Uvrštavanjem izraza za obodnu posmičnu brzinu obratka (v_{fo}) i posmak po zubu glodala (f_{zo}):

$$v_{fo} = D_o \pi n_o = f_{zo} z_g n_g \quad (22)$$

$$f_{zo} = \frac{v_{fo}}{n_g z_g} = \frac{D_o \pi n_o}{n_g z_g}, \text{ dobije se:} \quad (23)$$

$$R_T = \frac{f_{zo}^2}{8 R_o} \quad (24)$$

U slučaju korištenja 'wiper' pločice u formulu se uvrštava posmak za pločicu 'wiper' f_w umjesto posmaka po zubu glodala f_{zo} pa izraz glasi:

$$R_T = \frac{f_w^2}{8 R_o} \quad (25)$$

Dobiveni izraz za teorijsku hrapavosti površine nakon obrade ortogonalnim okretnim glodanjem pokazuje da će hrapavost ovisiti o kvadratu posmaka po zubu glodala i o promjeru

odnosno polumjeru komada koji obrađujemo. S druge strane, ako koristimo 'wiper' pločicu, jasno je da će hrapavost u tom slučaju ovisiti o posmaku za 'wiper' pločicu i promjeru obratka.

Ako se prema dobivenim izrazima za teorijsku visinu neravnina kod tokarenja (16) i ortogonalnog okretnog glodanja (25) primjeni isti posmak ($f=f_w$), tada je indeks pogodnosti jednak odnosu radijusa vrha alat za tokarenje i radijusa obratka kod ortogonalnog okretnog glodanja. S obzirom da je $r_e \ll R_o$, izrazi pokazuju da je u teoriji moguće postići znatno manju hrapavost obrađene površine postupkom ortogonalnog okretnog glodanja.

Indeks pogodnosti ' I_p ' definiran je kao metoda kojom se ocjenjuje pogodnost određenog postupka obrade. Ocjena pogodnosti provodi se s ciljem kvalitativne komparativne ocjene i svrstavanju postupaka obrade odnosno pogodniji je onaj postupak koji ima veći skup pozitivnih indeksa pogodnosti. Koristeći spoznaje iz [2] definira se indeks pogodnosti za ocjenu pogodnosti dva postupka obrade, uz iste uvjete obrade i isti obradni materijal.

Indeks pogodnosti je prema tome definiran izrazom [2]:

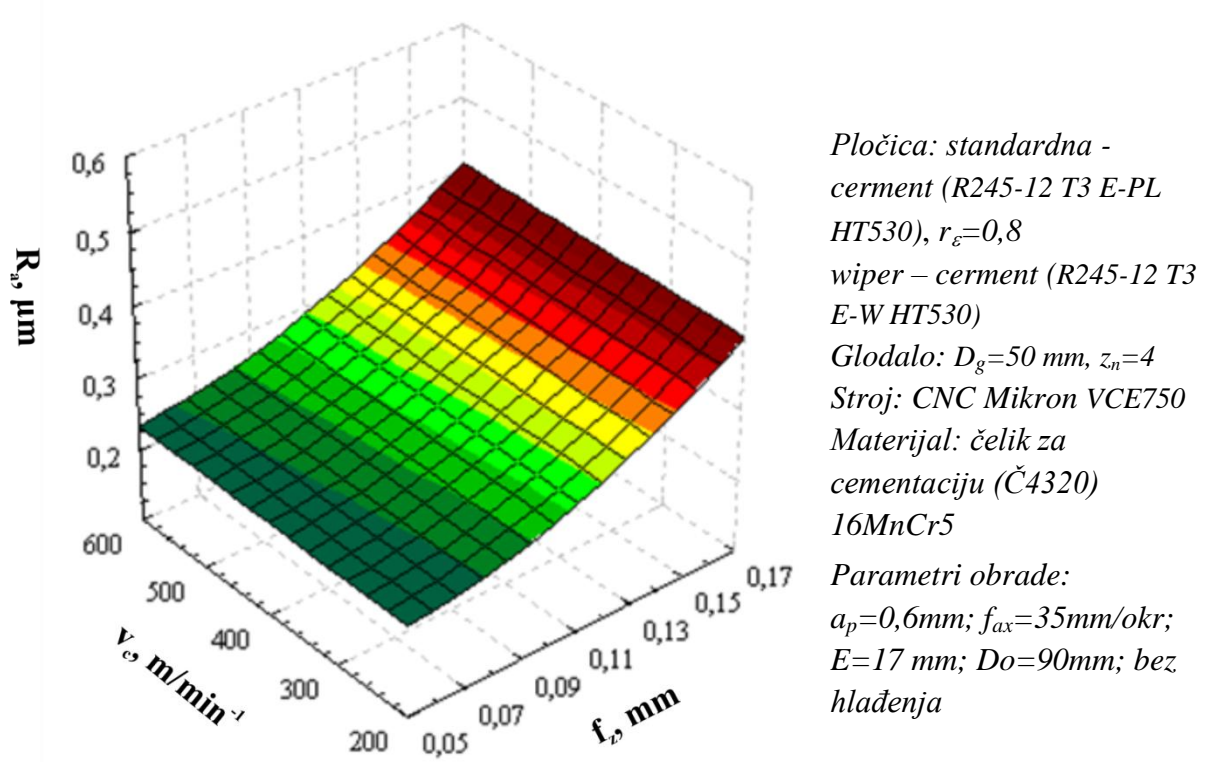
$$I_p = \frac{F_p p_1}{F_p p_2} \quad (26)$$

gdje je:

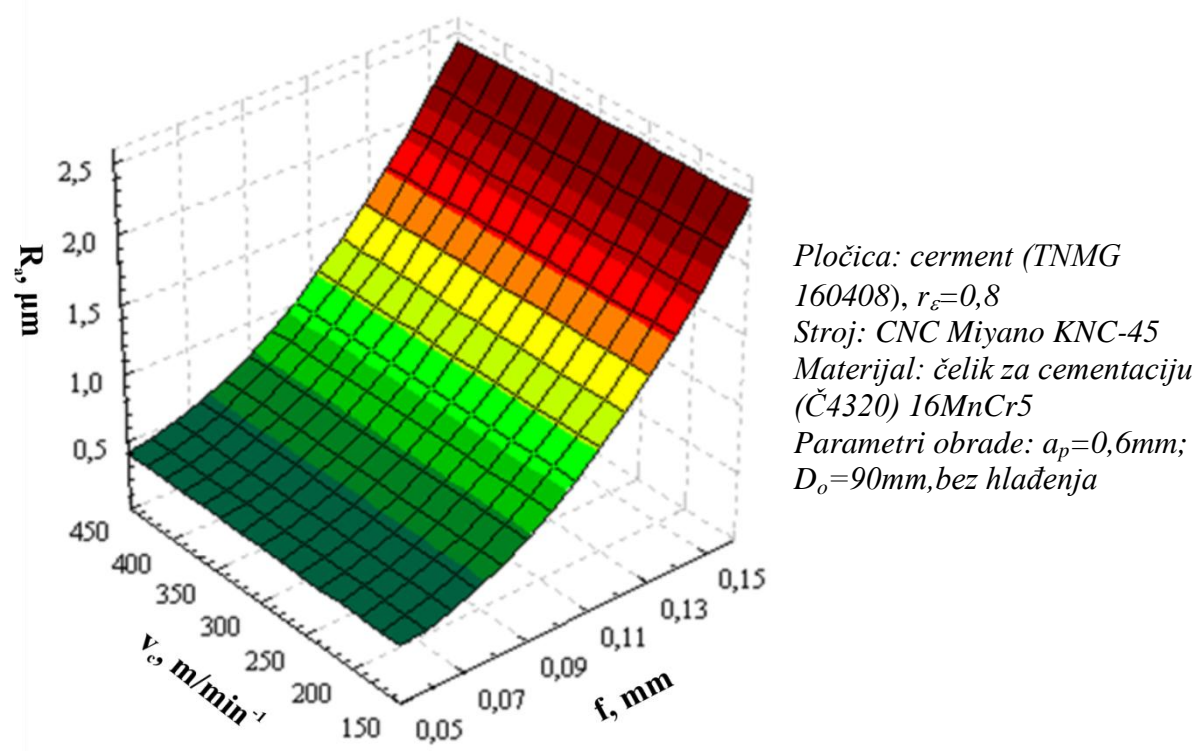
$F_p p_1$ – funkcija pogodnosti istraživanog postupka obrade

$F_p p_2$ – funkcija pogodnosti etalon postupka obrade

Na slikama 40. i 41. prikazani, prema [24] su rezultati istraživanja utjecaja parametara obrade na hrapavost obrađene površine. Time je ujedno i potvrđena teorijska pretpostavka da je postupkom ortogonalnog okretnog glodanja za isti raspon parametara obrade dobivena manja hrapavost obrađene površine.



Slika 40. Ovisnost parametra hrapavosti obrađene površine (R_a) o posmaku (f) i brzini rezanja (v_c) kod ortogonalnog okretnog glodanja [24]



Slika 41. Ovisnost parametra hrapavosti obrađene površine (R_a) o posmaku (f) i brzini rezanja (v_c) kod tokarenju[24]

4.5. Proizvodnost postupka obrade

Uobičajeno je proizvodnost postupka obrade iskazati kroz glavno vrijeme obrade, potrebno za obradu duljine neke površine u smjeru posmičnog puta alata.

4.5.1. Proizvodnost kod tokarenja

Vrijeme obrade kod tokarenja računa se prema formuli:

$$t_{g,tok} = \frac{L_f}{v_f} = \frac{L_f}{n_o f} = \frac{D_o \pi L_f}{v_c f} \quad (27)$$

4.5.2. Proizvodnost kod ortogonalnog okretnog glodanja

S gledišta proizvodnosti najuspješnija varijanta ortogonalnog okretnog glodanja je pozicija ekscentar. Dakle, u odnosu na centrično ortogonalno okretno glodanje, maksimalni aksijalni posmak tada može biti veći nekoliko puta, a ovisi o duljini čeone oštrice.

Vrijeme obrade kod pozicije ekscentar računa se prema formuli:

$$t_{g,oo} = \frac{L_f}{v_{fax}} = \frac{L_f}{n_o f_{ax}} \quad (28)$$

Frekvencija vrtnje obratka ovdje je izvedena veličina i računa se na sljedeći način:

$$n_o = \frac{f_z n_g z_g}{D_o \pi} = \frac{f_z v_c z_g}{D_o \pi^2 D_g} \quad (29)$$

Spajanjem prethodna dva izraza dobije se vrijeme obrade za poziciju ekscentar:

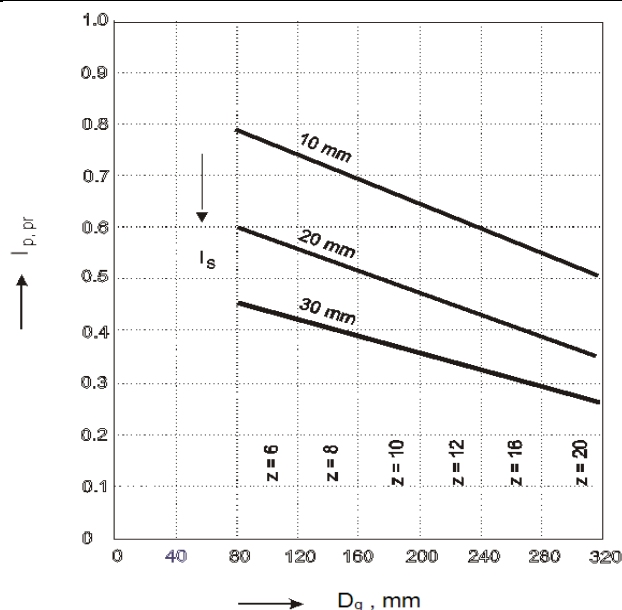
$$t_{g,oo} = \frac{D_o \pi^2 D_g L_f}{v_c f_{ax} f_z z_g} \quad (30)$$

Ako se vremena obrade kod ekscentričnog ortogonalnog okruglog glodanja i tokarenja stave u međusoban omjer dobije se indeks pogodnosti:

$$I_{p,proizv} = \frac{t_{g,oo}}{t_{g,tok}} = \frac{v_{c,tok} f}{v_{c,oo} f_z} \frac{D_g \pi}{f_{ax} z_g} \quad (31)$$

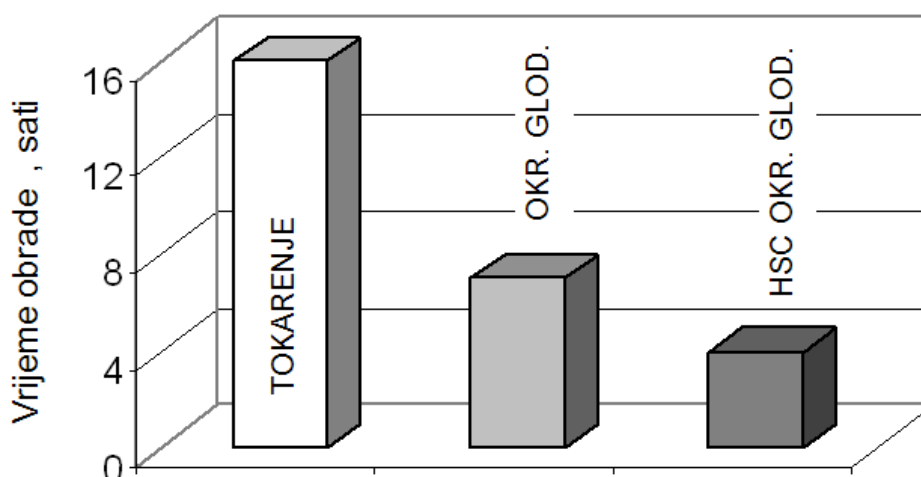
Ukoliko se primjene iste brzine rezanja i isti posmaci po oštrici, vrijedi izraz:

$$I_{p,proizv} = \frac{D_g \pi}{f_{ax} z_g} \quad (32)$$



Slika 42. Indeks pogodnosti ekscentričnog ortogonalnog okretnog glodanja i tokarenja [2]

Prema izrazu (32) indeks pogodnosti sada je funkcija veličine glodala, broja zubi glodala i aksijalnog posmaka glodala. Dijagram na slici 42. grafički je prikaz izraza (32) i pokazuje da je indeks pogodnosti, za iste brzine rezanja i iste posmake obrade, za $D_g > 80$ mm, uvijek manji od jedan i da u određenim slučajevima može biti i do 0,27. To govori o većoj proizvodnosti ortogonalnog okruglog glodanja u odnosu na tokarenje, čak i do 3,7 puta. Prema izrazu (31) još veće povećanje proizvodnosti pojaviti će se kod obradaka većih dimenzija i neuravnoteženih masa, jer se kod tokarenja moraju upotrijebiti nekoliko puta manje brzine rezanja od optimalnih, odnosno od onih kod ortogonalnog okruglog glodanja. Slika 43. upravo pokazuje rezultate u proizvodnji ležajnih rukavaca koljenastih osovina. Visokobrzinskim okruglim glodanjem smanjeno je vrijeme obrade, u odnosu na tokarenje, za četiri puta [2].



Slika 43. Smanjenje vremena obrade kod ležajnih rukavaca koljenastih osovina primjenom klasičnog i HSC okretnog glodanja [25]

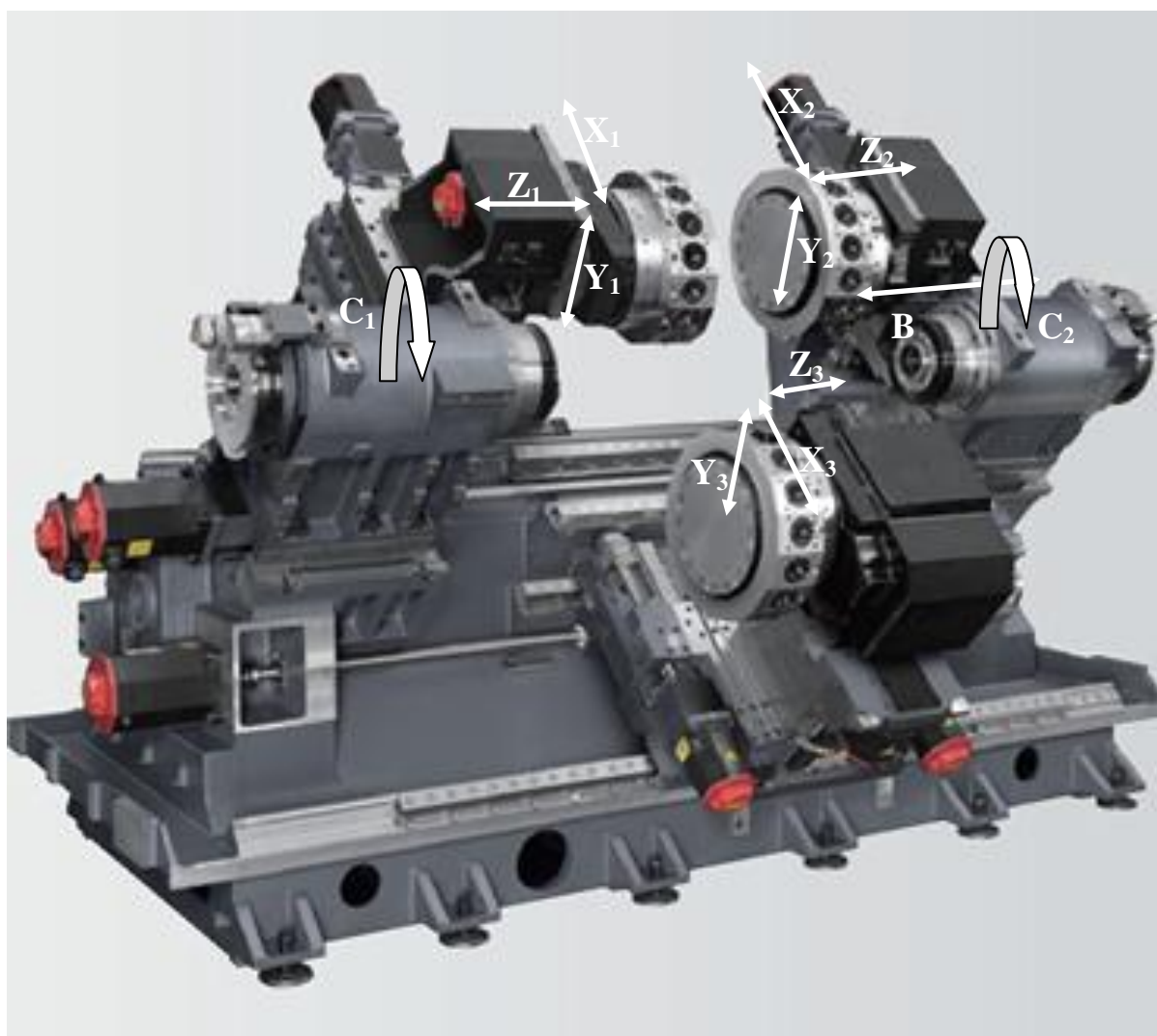
5. PRIMJER OBRADE BREGASTE OSOVINE TOKARENJEM I ORTOGONALNIM OKRETNIM GLODANJEM



Slika 44. Bregasta osovina [26]

Za slikoviti prikaz komparativne analize kao primjer odabrana je realna obrada bregaste osovine gdje je su prikazana oba postupka obuhvaćena u ovom radu.

Stroj na kojem je to odrađeno jest višeosni tokarski centar NZ2000T2Y2 tvrtke Mori Seiki. Pripremno završna vremena i vremena obrade smanjena su ne samo zbog upotrebe ortogonalnog okretnog glodanja umjesto tokarenja već i sposobnosti stroja za izvođenjem više operacija u jednom stezanju. Dodatna sposobnost je korištenje i dodatne, jedne ili dvije, revolverske glave koje omogućuju istovremenu obradu obratka u glavnom vretenu ili obradu s jednom ili dvije glave na glavnom vretenu, a treće revolverske glave na pomoćnom vretenu. Svaka od revolverskih glava može primiti 16 pokretnih ili nepokretnih alata.

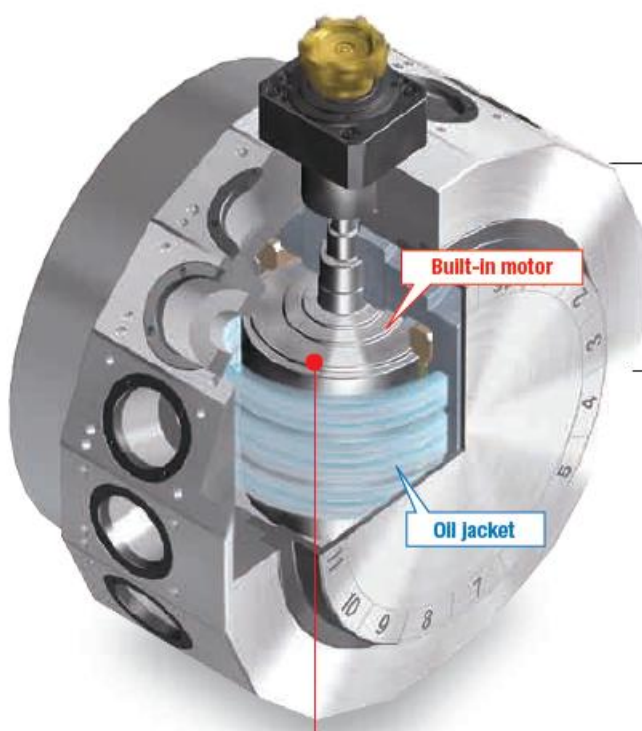


Slika 45. Obradni centar Mori Seiki - bez zaštitnih dijelova [17]

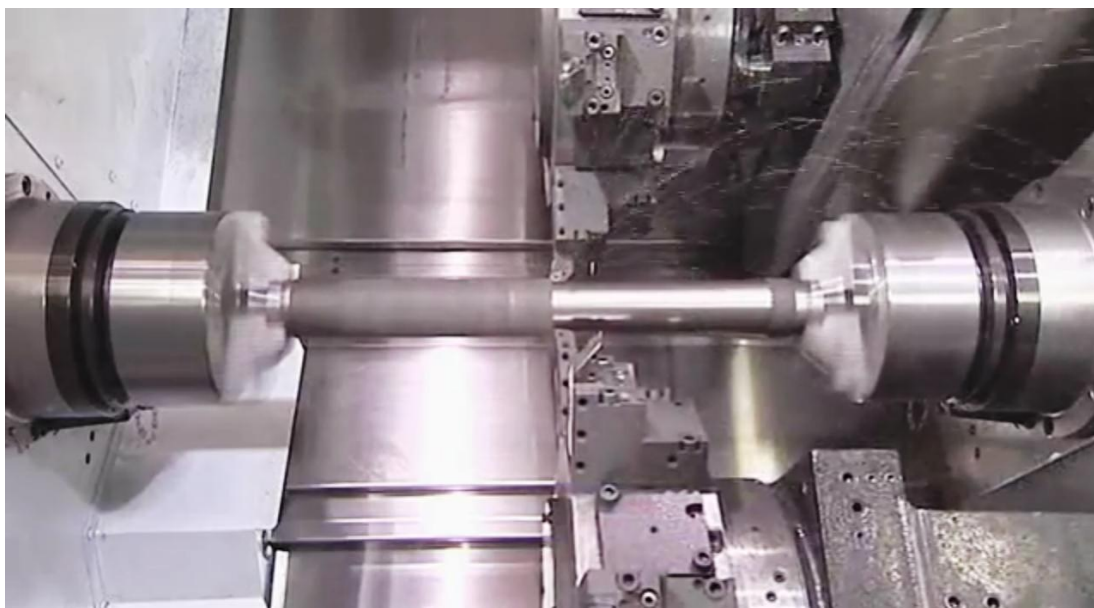
Tehničke specifikacije stroja NZ2000T2Y2 (sa 2 revolverске glave) [17]:

- glavno vreteno: 5000 min⁻¹; 25kW
- pomoćno vreteno: 5000 min⁻¹; 25kW
- gornje vreteno držača alata: 6000 min⁻¹; 7,35kW
- donje vreteno držača alata: 12 min⁻¹; 7,35kW
- kapacitet magazina alata: 2 revolver glave sa po 16 alata svaka (ukupno 32)
- upravljane osi: X(X₁ i X₂), Y(Y₁ i Y₂), Z (Z₁ i Z₂), C(C₁ i C₂), B

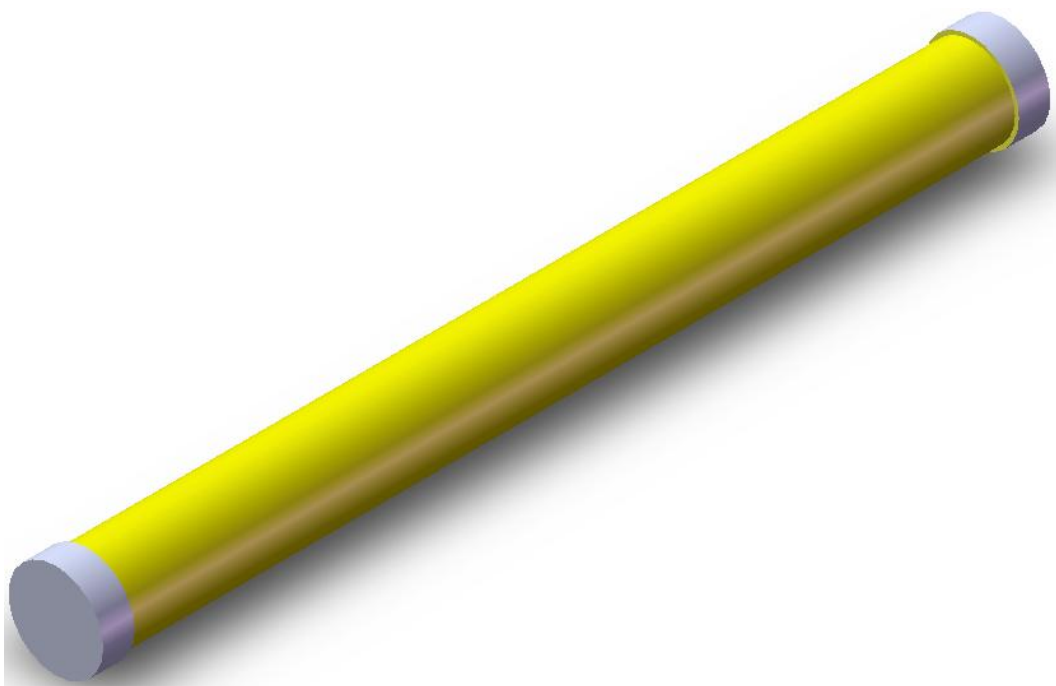
Proizvođač navodi ukupno 9 osi na modelu sa 2 revolverске glave, odnosno 12 osi na modelu sa 3 revolverске glave. Unutar revolverских glava nalaze se motori za pokretne alate prikazani na slici 46. Navedene karakteristike stroja omogućavaju obradu okruglih i neokruglih površina obradaka kombinacijom tokarenja i glodanja. Takav primjer obrade je i obrada već spomenute bregaste osovine, a u daljnjem tekstu prikazane su operacije obrade.



Slika 46. Ugrađeni motor za pokretne alate [17]

Operacija 10 – uzdužno tokarenje**Slika 47. Uzdužno tokarenje[26]**

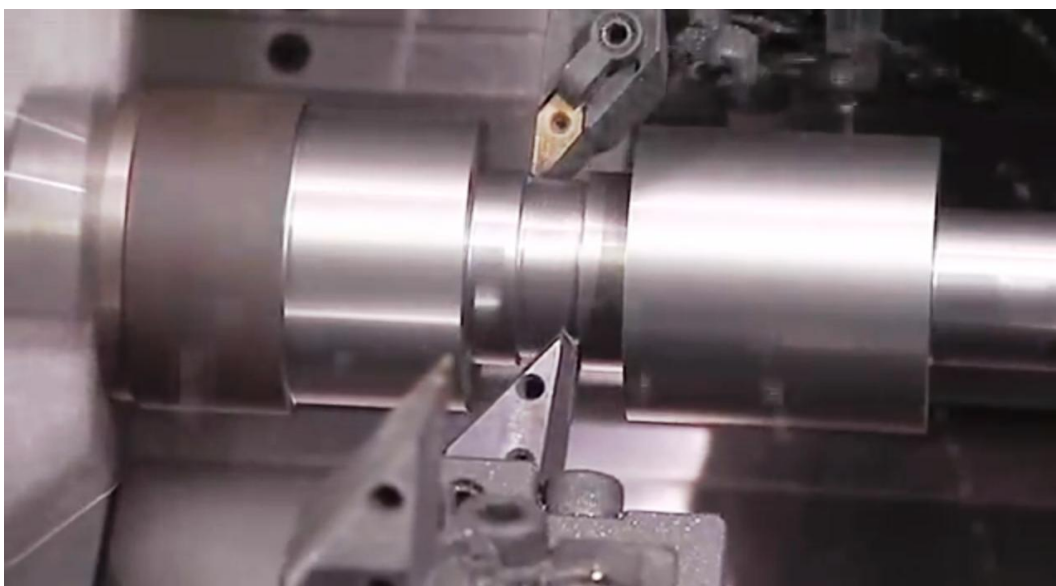
Obrada počinje rezanjem šipke promjera Ø65 na dužinu od 600mm. S obzirom da je stroj opremljen sa dva vretena za rotaciju obradaka (glavno i pomoćno), nije potrebno zabušivanje središnjeg uvrta. Operacijom 10 vrši se uzdužno tokarenje s ciljem poravnavanja cilindrične površine i skidanjem oksidirane površine pripremkama. Tokarenje (slika 47.) se vrši pomoću 2 ista alata od kojih je jedan na gornjem držaču alata, a drugi na donjem. Njihovim sinkroniziranim radom omogućena je dvostruko brža obrada nego što bi to bilo moguće na obradnom centru sa jednom revolverskom glavom. U ovom slučaju, oba rezna alata su postavljena na istu dubinu obrade, ali postoji mogućnost da se alata koji prvi krene u obradu postavi na pola zahtijevane dubine, a drugi alat na drugu polovicu dubine čime bi se moglo dodatno ubrzati vrijeme obrade.



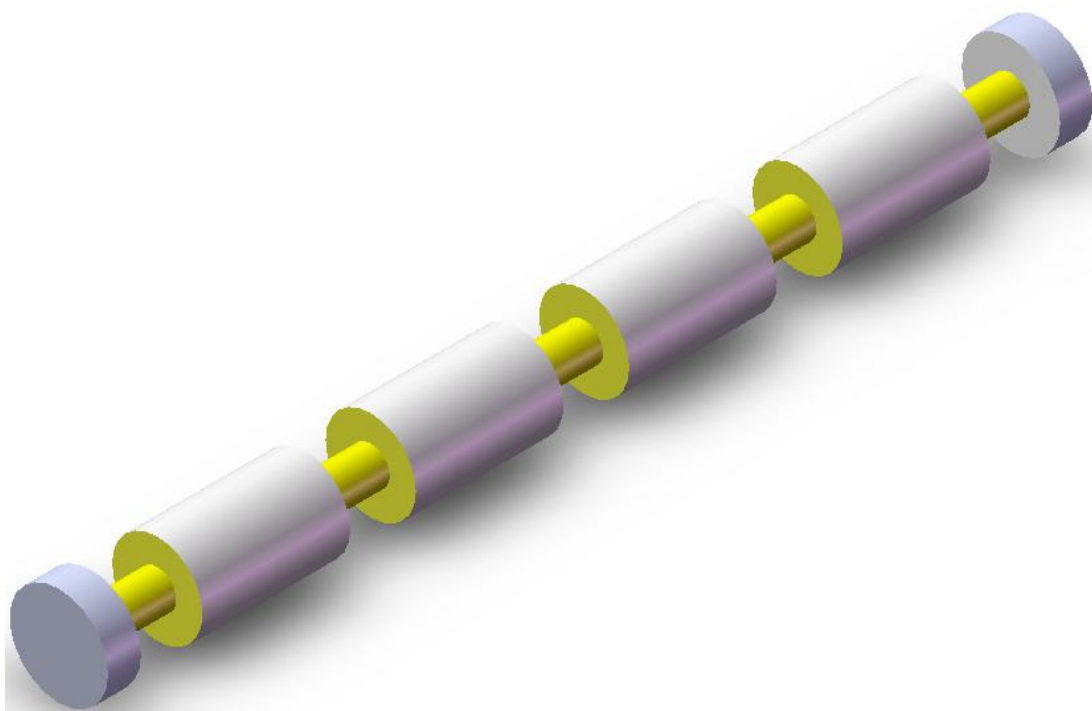
Slika 48. Uzdužno vanjsko tokarenje – CAD prikaz

Operacija 20 – grubo tokarenje

Postoje bregaste osovine za različite namjene tako da operacija grubog tokarenja između bregova, u ovom slučaju, nema posebni značaj osim smanjenja mase osovine. U nekim slučajevima na tim mjestima je moguće staviti pogonske zupčanike ili pak dodatne oslonce ako je osovina jako dugačka.

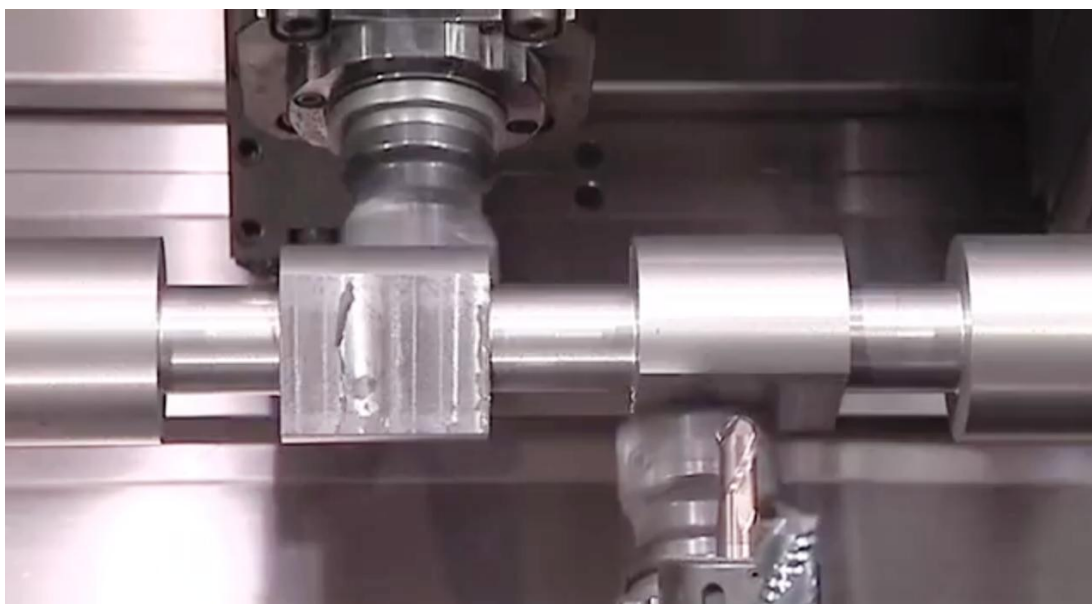


Slika 49. Grubo tokarenje [26]



Slika 50. Grubo glodanje – detaljniji CAD prikaz

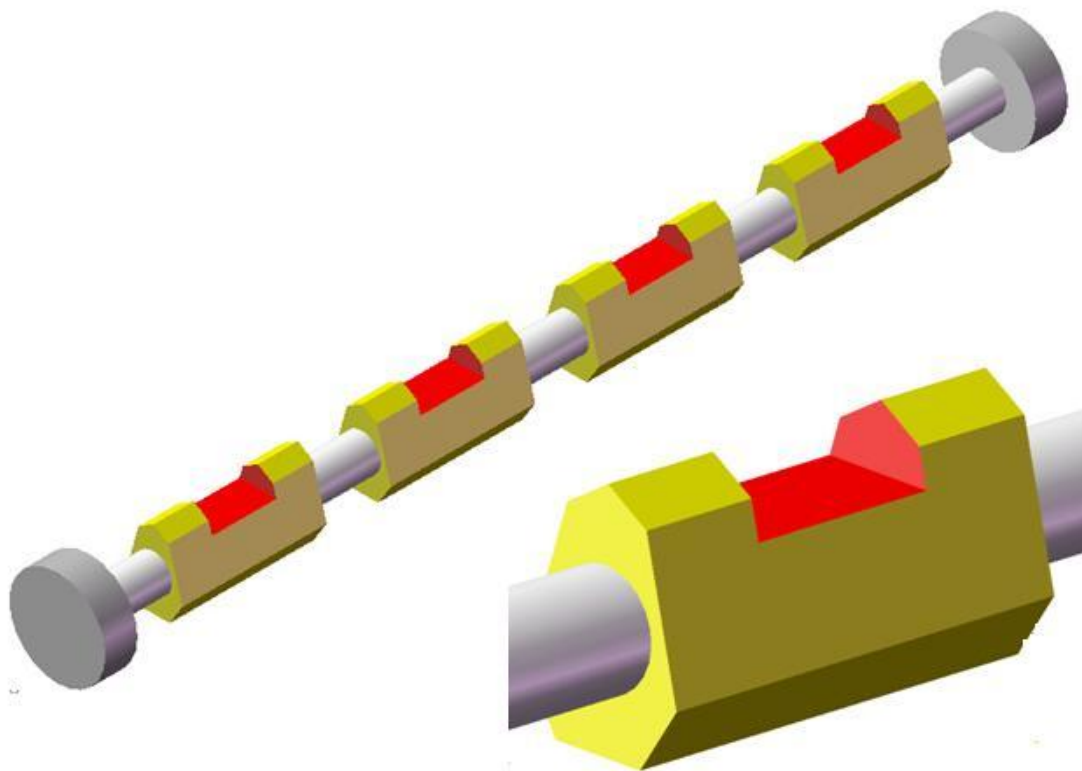
Operacija 30 – grubo glodanje bregova osovine



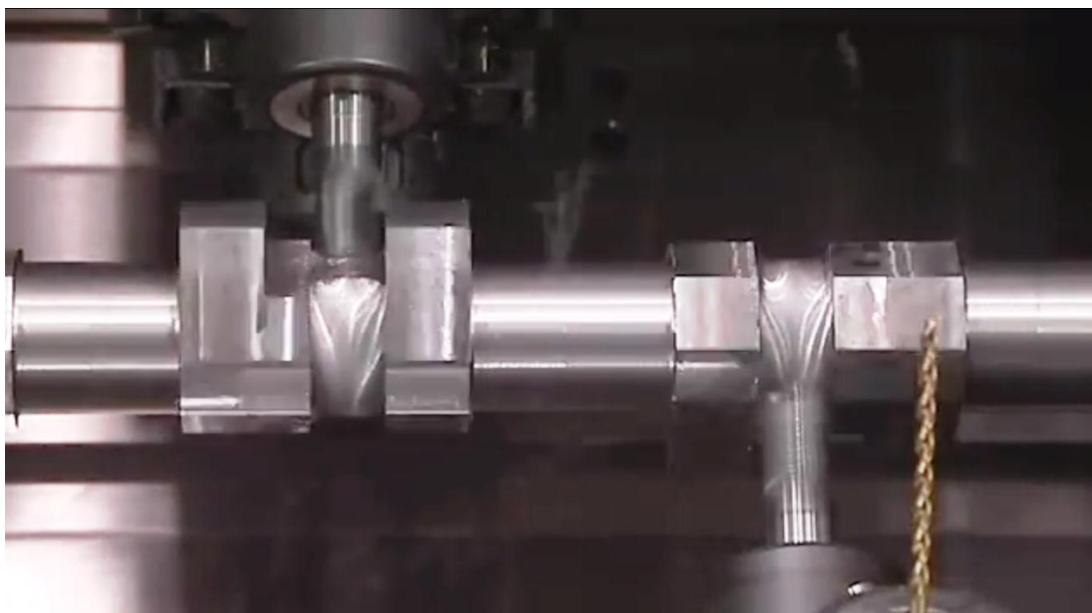
Slika 51. Grubo ravno glodanje bregova [26]

U ovoj operaciji prikazano je ravno glodanje bregova osovine. U vrlo kratkom roku se glodalom ($\varnothing 50$ mm) skida veliki volumen odvojene čestice kako bi se dobio karakterističan

oblik prikazan na slici 51. koji prati konture budućeg brijega osovine. Proces se odvija simultano i sinkronizirano pomoću oba vretena držača alata. Nakon toga se manjim glodalom ($\varnothing 14$ mm) dodatno skida materijal na mjestima gdje dolaze ležajevi (slika 52.). Operaciju obrade manjim glodalom je bilo moguće i preskočiti te postupak izvesti kako je prikazano operacijom 40, ali tu tom slučaju bi vrijeme obrade bilo duže.



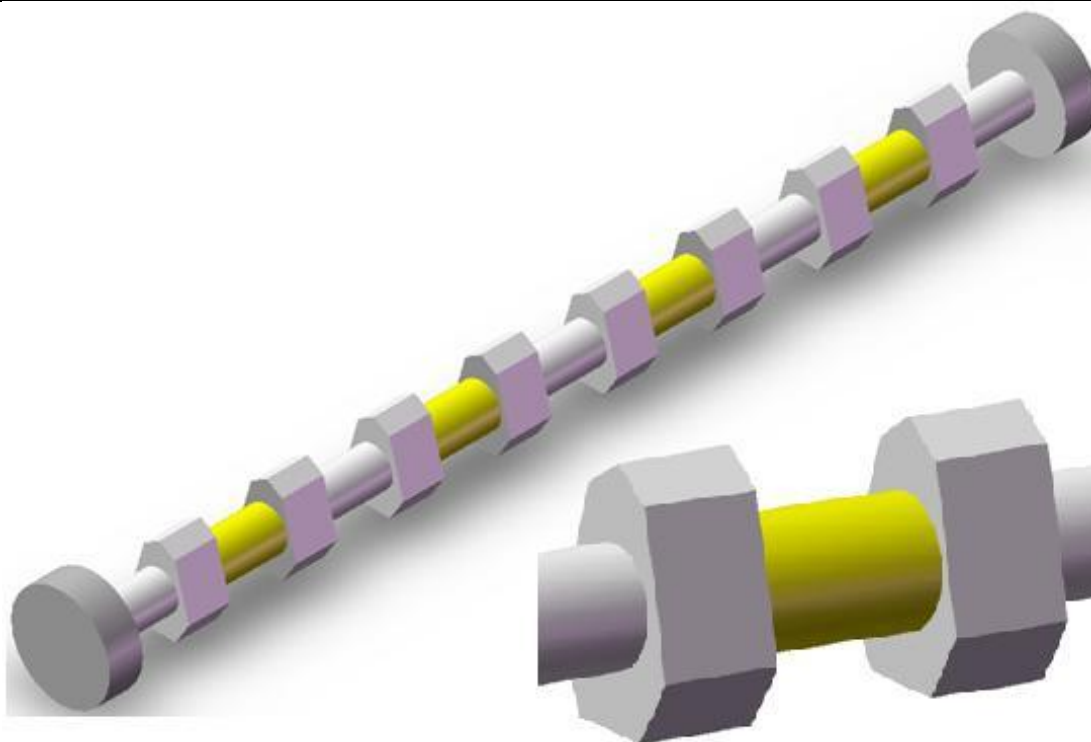
Slika 52. Detaljniji CAD prikaz grubog glodanja bregova

Operacija 40 – grubo glodanje mjesta uležištenja

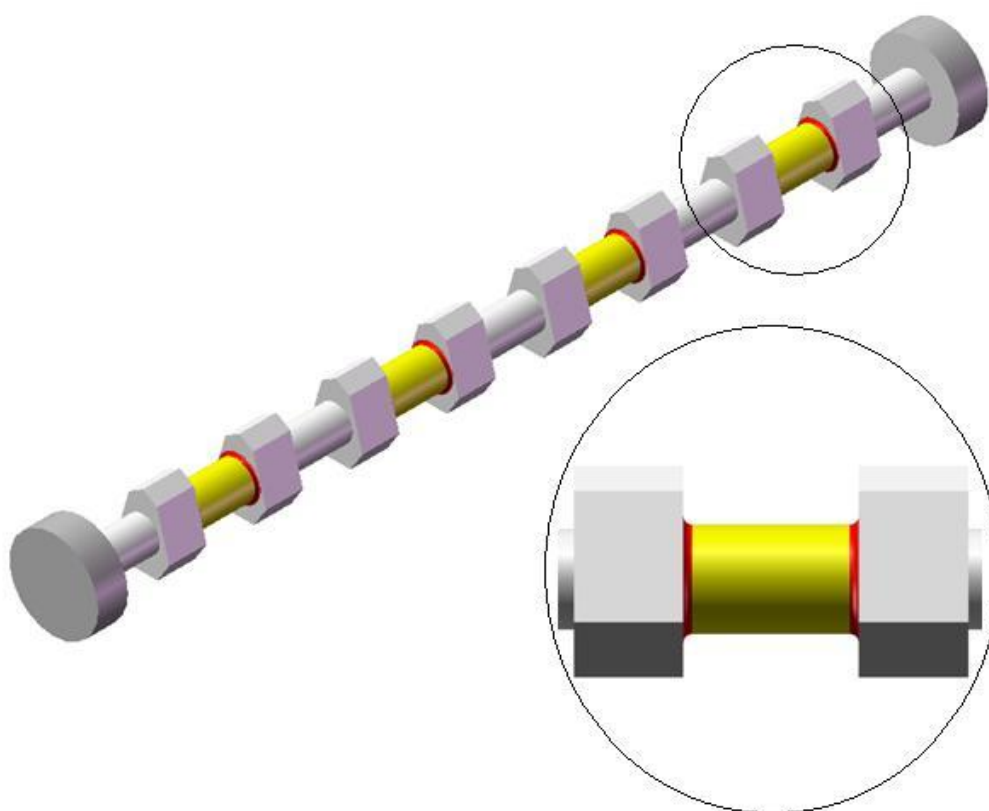
Slika 53. Grubo ortogonalno okretno glodanje bregova i mjesta uležištenja [26]

Iako je cilj dobiti na kraju dobiti cilindričnu površinu, umjesto tokarenjem, ova operacija izvedena je ortogonalnim okretnim glodanjem, a osnovi razlog je što početna površina nije idealno kružna već je nepravilnog šesterokutnog oblika dobivenog prethodnom operacijom glodanja. Ukoliko bi se ova operacija izvela tokarenjem, prikazani oblik površine imao bi izrazito negativan utjecaj na rezni alat zbog periodičkog zahvata obrade. Tokarski nož bio bi pod velikim dinamičkim opterećenjem što bi izazvalo vibracije, a kao posljedicu toga i neravnine na površini obratka ili u najgorem slučaju pucanje oštrice alata. Ukoliko se vrši obrada tokarenjem ekscentričnog odnosno neokruglog komada ne može, zbog velikih centrifugalnih sila, raditi optimalnim brzinama rezanja. Kod ortogonalnog okretnog glodanja taj problem je eliminiran zbog upotrebe glodala sa vlastitim pogonom pri čemu je moguće optimirati brzine rezanja odnosno frekvenciju vrtnje obratka.

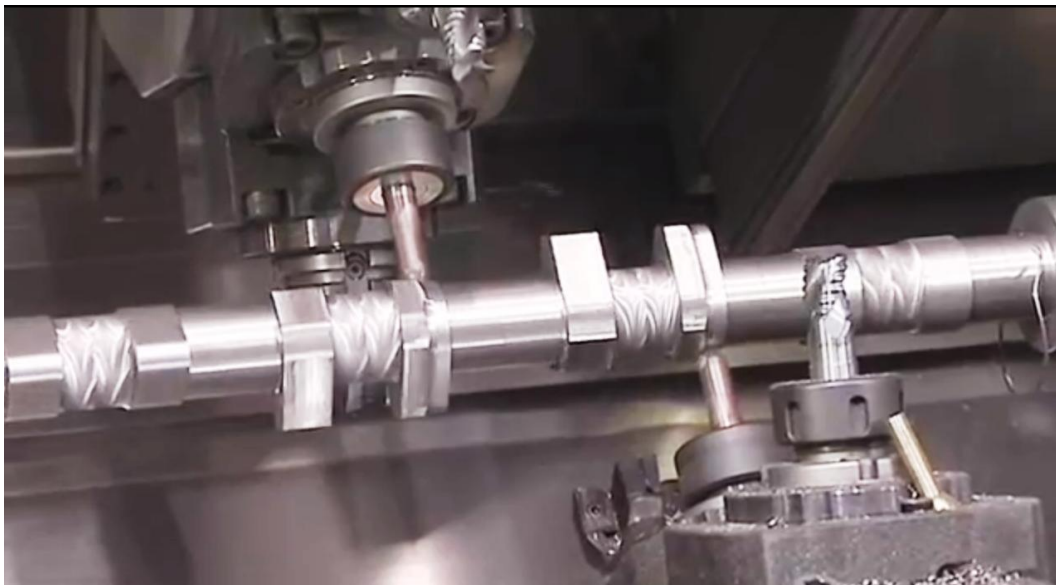
Prilikom obrade u ovoj operaciji koristi se ekscentrično ortogonalno okretno glodanje zbog čega će, kako je i prikazano detaljem na slici 55. između obrađenog dijela i brijega osovine ostati radijus materijala koji će operacijom 60 biti naknadno obrađen. Kako je i zaključeno u radovima [27][28][29][30] "pozicija C" (slika 15.) daje najmirniji rad, najveću proizvodnost te su udarna opterećenja najpovoljnija.



Slika 54. Grubo ortogonalno okretno glodanje bregova i mjesta uležištenja – CAD prikaz



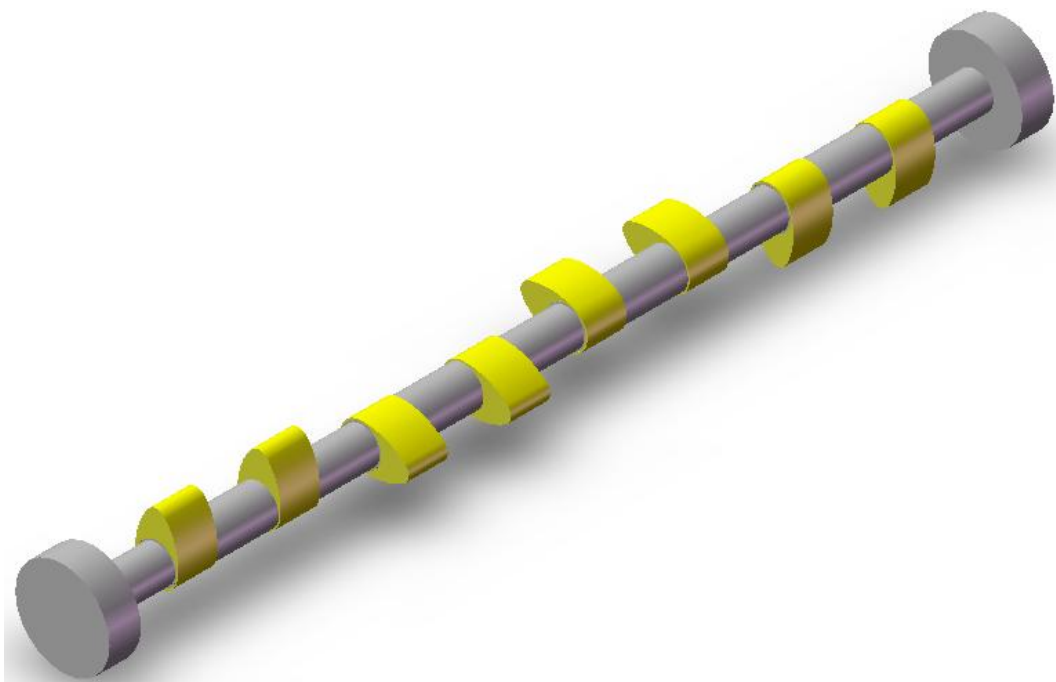
Slika 55. Prikaz detalja nakon obrade ekscentričnim ortogonalnim okretnim glodanjem

Operacija 50 – fino glodanje bregova

Slika 56. Fino ortogonalno okretno glodanje bregova kuglastim glodalom [26]

Slika 56. prikazuje fino glodanje kuglastim glodalom no ista operacija mogla je biti izvedena i standardnim cilindričnim glodalom kakvo je korišteno u prethodnoj operaciji.

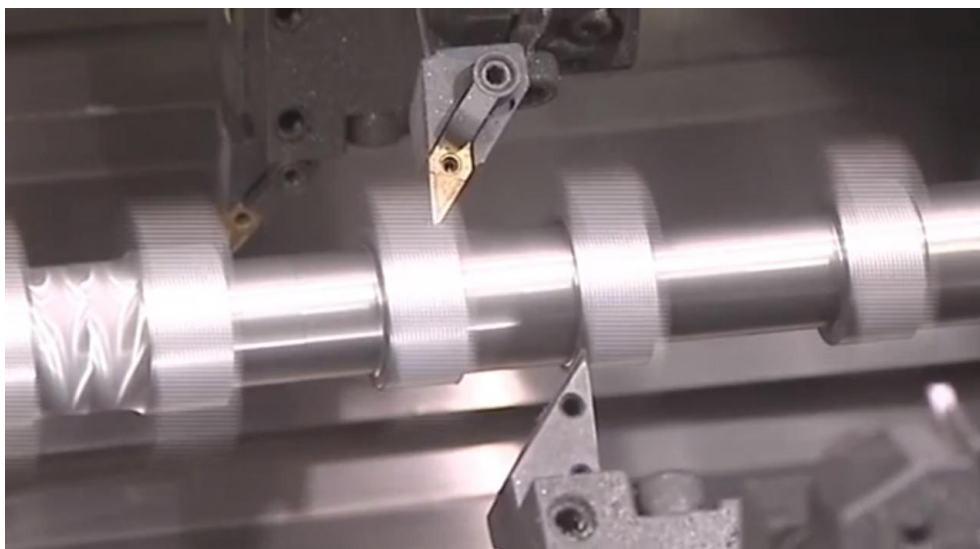
Na navedenoj slici također su vidljivi tragovi glodanja u različitim smjerovima na mjestima prethodne obrade mjesta uležištenja. Prema autorima [15][16] ti tragovi su optička varka budući da se radi o hrapavostima reda mikrometra te je to ujedno i gruba obrada.



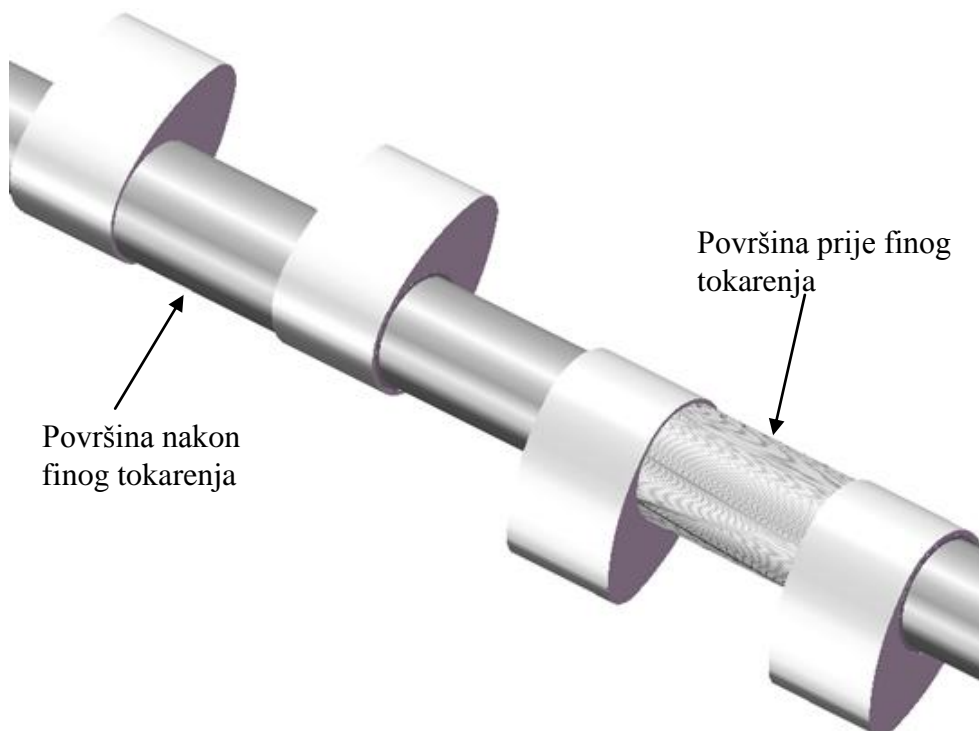
Slika 57. CAD prikaz bregaste osovine nakon finog ortogonalnog okretnog glodanja

Operacija 60 – fino tokarenje bregova i mjesta uležištenja

U ovoj operaciji izvodi se završno, fino tokarenje bočnih strana bregova te mjesta gdje se nalaze ležajevi. Na slici 58. vidljiva je grubo obrađena površina na mjestima uležištenja te fino obrađena površina. Bočne strane svakog brijega su poravnate zbog neravnina koje su nastale okretnim ortogonalnim glodanje. Ovom operacijom skinuti su i radijusi materijala preostali nakon operacije 40.



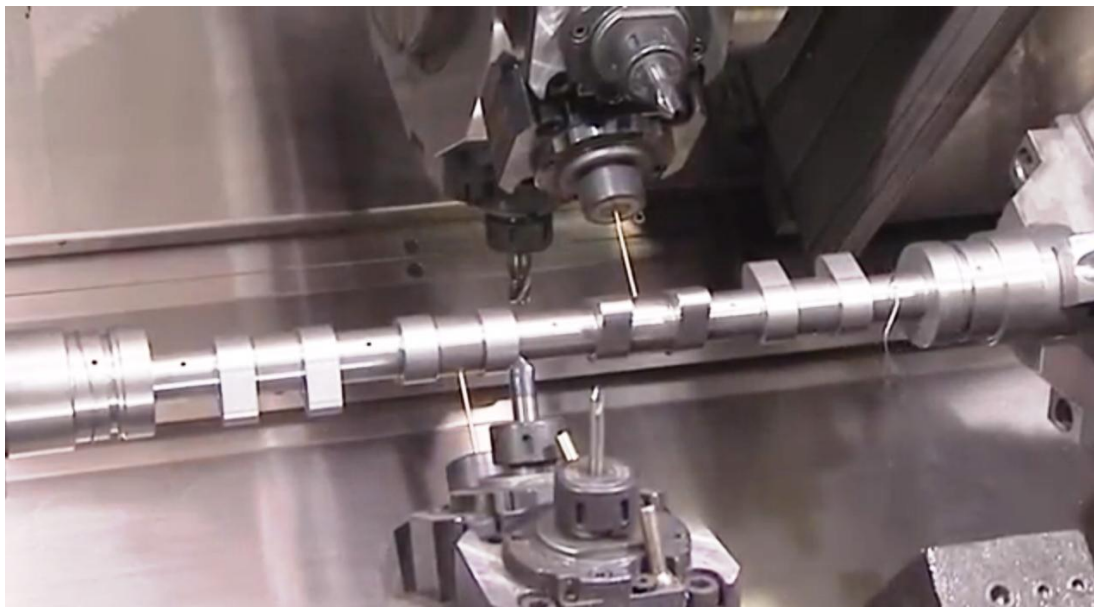
Slika 58. Fino završno tokarenje mjesta uležištenja i bočnih strana bregova [26]



Slika 59. Izgled površine prije i nakon fine obrade tokarenjem mjesta uležištenja

Operacija 70 – bušenje kanala

Na kraju se vrši bušenje rupa specijalnim dugačkim svrdlima.



Slika 60. Bušenje kanala za podmazivanje [26]

6. ZAKLJUČAK

U radu je dana komparativna analiza u kojoj je uspoređen postupak obrade odvajanjem čestica – tokarenje te jedan noviji postupak – ortogonalno okretno glodanje. Uspoređene su najvažnije karakteristike koje se promatraju kod svakog postupka obrade odvajanjem čestica – rezni alati, obradni strojevi, kakvoća obrađene površine, generirana odvojena čestica, postojanost alata i proizvodnost. Na temelju sličnosti i različitosti tih dvaju postupaka donesen je zaključak o pogodnosti pojedinog procesa u određenim situacijama.

U poglavlju 4.1. analizirana je postojanost odnosno vijek trajanja alata koji je definiran kao količina reznih karakteristika novog reznog alata sve dok zadovoljava postavljene zahtjeve obrade. Za postupak tokarenja je još početkom 20. st. F.W. Taylor, na temelju svojih istraživanja, dao formulu za utvrđivanje postojanosti alata s obzirom na brzinu rezanja kao najutjecajniji parametar obrade na trošenje alata. Prema Tayloru dobivene su i tipske krivulje trošenja kojima se, za različite brzine rezanja, može dobiti podatak o postojanosti alata. S obzirom da ortogonalno okretno glodanje relativno noviji postupak obrade, do sada još nisu provedena detaljnija istraživanja na temu utjecaja parametara obrade na postojanost alata niti je njihov utjecaj matematički opisan. Iako postoje alati posebno za namjenu ortogonalnog okretnog glodanja, proizvođači alata nisu objavili provedena istraživanja tako da se u proizvodnji većinom koriste spoznaje iz klasičnog glodanja. Ono što je poznato i dostupno su istraživanja koje je prezentirao W. König u svojim radovima [16] i [21]. Veće trošenje rezne oštrice pri obradi tokarenjem može se tumačiti puno bržim zagrijavanjem rezne oštrice odnosno slabijim hlađenjem zbog stalnog kontakta alata i obratka. Osim što je smanjeno trošenje kod ortogonalnog okretnog glodanja omogućene su i veće brzine obrade, a time i veća proizvodnost.

Nadalje, u poglavlju 4.3. detaljnije je analiziran oblik odvojene čestice. Proces stvaranja odvojene čestice jednak je za gotovo sve procese obrade te je iz tog razloga istraživao kako bi se jasno unaprijed mogla odrediti brzina, posmak i dubina obrade te ostali parametri obrade za svaki proces. odvojena čestica kod tokarenja može imati različite oblike pa je prema [23] i podijeljena u 4 grupe što znači da će odabirom različitih parametara obrade čestica imati oblik od nepovoljne (duga i tanka tekuća – $k_{o\check{c}}=60-400$) do pogodne ($k_{o\check{c}}=5-10$). Složeni kinematski proces ortogonalnog okruglog glodanja ima za posljedicu i karakterističan presjek odvojene čestice, koji se neprestano mijenja tijekom zahvata, odnosno vremena. Kako prikazuje slika 36.

odvojena čestica kod ortogonalnog okruglog glodanja, po istoj klasifikaciji od [23] svrstava se u: pogodna ($k_{oc} = 5-10$), odnosno kod postupka ortogonalnog okretnog glodanja, zbog više reznih oštrica i isprekidanog kontakta s obratko nemoguće je generirati nepovoljnu odvojenu česticu kao u postupku tokarenja.

U jednadžbama (16) i (26) dani su izrazi za teorijsku visinu neravnina kod postupka tokarenja odnosno ortogonalnog okretnog glodanja dok su na slikama 40. i 41. prikazani eksperimentalno dobivene vrijednosti hrapavosti obrađene površine navedenim postupcima. Eksperimentalnim istraživanjem potvrđena je teorijska pretpostavka za ostvarivanje znatno manje hrapavosti obrađene površine kod postupka ortogonalnog okretnog glodanja što je posebno izraženo kod obrade obradaka većih dimenzija ($D_o > 80\text{mm}$) i kod visokobrzinske obrade.

U završnom poglavlju komparativne analize postupaka tokarenja i ortogonalnog okretnog glodanja analizirana je proizvodnost koja se iskazuje kroz glavno vrijeme obrade, potrebno za obradu duljine neke površine u smjeru posmičnog puta alata. Prema izrazima (31) i (32) indeks pogodnosti ovisi o veličini glodala, broja zubi glodala i aksijalnog pomaka glodala dok slika 42. grafički prikazuje izraz (32). Vidljivo je da je za veće obratke ($D_o > 80\text{mm}$) pri istom posmaku i brzini rezanja indeks pogodnosti uvijek manji od jedan što govori u puno većoj proizvodnosti ortogonalnog okretnog glodanja u odnosu na tokarenje pa čak i do 3,7 puta dok će prema izrazu (31) još veća razlika u proizvodnosti pojaviti kod obradaka većih dimenzije i neuravnoteženih masa. Razlog je puno manje brzine rezanja kod tokarenja zbog ekscentričnih i neujednačenih masa obratka.

Dokaz za sve do navedeno prikazan je u posljednjem poglavlju rada na primjeru suvremene izrade bregaste osovine gdje je u nekoliko operacija tokarenje zamijenjeno postupkom ortogonalnog okretnog glodanja.

LITERATURA

- [1] Grzesik W.: Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modeling and Applications, Elsevier, 2008.
- [2] Škorić S.: Istraživanje pogodnosti obrade ortogonalnim okruglim glodanjem, Disertacija, FSB Zagreb, 2002.
- [3] Ciglar D., Udiljak T., Mulc T., Staroveški T.: Suvremeni alatni strojevi i njihovi moduli, 3rd International Conference "Vallis Aurea", 5.10.2012.
- [4] www.fsb.unizg.hr/kas, Procesi obrade odvajanje, *Pristup*: 25.09.2013.
- [5] www.mmsonline.com/articles, Tehnology and Trends in CAM Software, *Pristup*: 27.09.2013.
- [6] www.mmsonline.com/articles, Trends That Drive Cutting Tools Development, *Pristup*: 29.09.2013.
- [7] www.mmsonline.com/articles, Tehnology Trends in CAM Software, *Pristup*: 27.09.2013.
- [8] www.mmsonline.com/articles, Knowledge-Based Software Boosts Part Programming Productivity, *Pristup*: 01.10.2013.
- [9] Šavar Š.: Obrada odvajanjem čestica II dio, FSB Zagreb, 1990.
- [10] www.mitsubishicarbide.net, Technical information, *Pristup*: 29.09.2013.
- [11] Šavar Š.: Obrada odvajanjem čestica I dio, FSB Zagreb, 1977.
- [12] www.fsb.unizg.hr/kas, Obrada odvajanjem, *Pristup*: 03.10.2013.
- [13] www.carbideanddiamondtooling.com, *Pristup*: 27.10.2013
- [14] www.sandvik.coromant.com, *Pristup*: 28.09.2013.
- [15] König W., Wand Th.: Exzentrisches Drehfrasens, Industrie Anzeiger 30 1984/106, strana 34
- [16] König W., Wand Th.: Zur Technologie des exzentrischen Drehfrasens, VDI-Z br. 15/16, 1984/120, strana 557
- [17] www.moriseiki.eu, *Pristup*: 20.10.2013.
- [18] www.productmachining.com, Mazak Corporation's Knowledge Center, *Pristup*: 15.10.2013
- [19] www.mmsonline.com/articles, Five levels od Multitasking, *Pristup*: 15.10.2013
- [20] www2.coromant.sandvik.com, Online katalog, 2006, *Pristup*: 28.09.2013.

- [21] König W., Wand Th.: Frasen statt Drehen: Drehfrase, Industrie anzeiger 1986/108, strana 25
- [22] www.mmsonline.com/articles, Read your chips, *Pristup*: 23.10.2013.
- [23] König W.: Fertigungsverfahren Band 1, VDI Verlag Dusseldorf 1990
- [24] Škorić S., Motika R.: Comparasion of roughness function of the machined surface in turning and orthogonal turn-milling, 7th International Research/Expert Conference, Barcelona, 2003.
- [25] Muller M., Gesell R., Hainloth M.: Werkzeuge zum Hochgeschwindigkeits-Frasen, Werkstatt und Betrieb 132(1999), strana 56
- [26] www.youtube.com, NZ2000 T2Y2 Camshaft Demonstration, *Pristup*: 23.10.2013.
- [27] Pogačnik M.: Vstopno izstopne razmere pri visokohitrostnem čelnem stružilnem frezanju, Disertacija, Ljubljena 1997.
- [28] Kopač J., Dolinšek S., Pogačnik M.: Turn milling dynamics and its influence on machining surface quality, 25th CIRO International Seminar, Bled 1993
- [29] Kopač J., Pogačnik M.: Theoretical Basis and Practical Applicability of Turnmilling, Strojarsstvo 38(4,5)/1996, strana 171 do 174
- [30] Kopač J., Pogačnik.: Vibration Influence on Trunmilling Process, 27th CIRP Internationl Seminar on Manufacturing Systems, 1995. Ann Arbor, Michigan, USA, strana 375 do 377